

**Technická univerzita v Liberci**  
**Fakulta textilní**

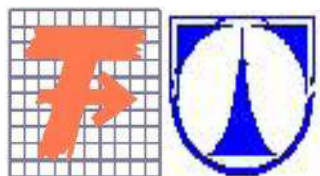
**Diplomová práce**

**2011**

**Michal Havlíček**

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**



Studijní program: 3106 T Textilní inženýrství  
Studijní obor: Textilní materiálové inženýrství

**Analýza chování osnovy na tkacím stroji při různých  
klimatických podmínkách**

Návaznost na projekt: GAČR 101/09/0466

**Analyzing the behavior of the warp weaving machine  
at different climatic conditions**

Vypracoval : Michal Havlíček

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Tumajer, Ph.D

**Rozsah práce :**

Počet stran textu: 63

Počet tabulek: 7

Počet obrázků: 30

Počet grafů: 4

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal HAVLÍČEK**  
Osobní číslo: **T08000131**  
Studijní program: **N3106 Textilní inženýrství**  
Studijní obor: **Textilní materiálové inženýrství**  
Název tématu: **Analýza chování osnovy na tkacím stroji při různých klimatických podmínkách**  
Zadávající katedra: **Katedra textilních materiálů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte rešerši na dané téma.
2. Teoreticky popište způsob namáhání osnovních nití na tkacím stroji a vliv klimatických podmínek na deformační vlastnosti osnovních nití během tkacího procesu
3. Navrhněte vhodný experiment, který umožní analyzovat deformační vlastnosti osnovních nití při různých klimatických podmínkách a tento experiment realizujte pro vybrané materiály
4. Výsledky experimentu konfrontujte s teorií a realizujte posouzení vlivu klimatických podmínek na deformační vlastnosti osnovních nití z hlediska jejich zpracování na tkacím stroji

Rozsah grafických prací:  
Rozsah pracovní zprávy: 45  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] Plander I.: Dynamické vlastnosti viskoelastických materiálů a ich meranie, Vydavateľstvo Slovenskej Akadémie Vied, Bratislava, 1964
- [2] Blažej A.: Vlastnosti textilních vláken, Vydavateľstvo technickém a ekonomickej literatúry, Bratislava, 1982
- [3] Tumajer., P.; Bílek, M., Strašáková, P.: Mutual action force between weaving machine and textile material, X. International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, Technical University of Liberec - Department of Textile Machines Design, Liberec, Česká republika

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Tumajer, Ph.D.  
Katedra textilních technologií  
Konzultant diplomové práce: Ing. Eva Moučková, Ph.D.  
Katedra textilních technologií

Datum zadání diplomové práce: 29. října 2010  
Termín odevzdání diplomové práce: 2. května 2011

  
prof. RNDr. Aleš Linka, CSc.  
děkan



  
prof. Ing. Jiří Militký, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 29. října 2010

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 2. 5. 2011

.....  
Michal Havlíček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji panu Ing.Petru Tumajerovi, Ph.D za odborné vedení této diplomové práce a za velmi cenné rady, které mi pomohly při vypracování. Dále děkuji celé své rodině a Technické univerzitě v Liberci za to, že mně studium umožnili.

## **ANOTACE**

Tato diplomová práce je vypracována na téma analýza chování osnovy na tkacím stroji při různých klimatických podmínkách. Hlavním úkolem této diplomové práce je popsat vliv klimatických podmínek na deformační vlastnosti osnovní příze. Cílem práce je realizovat experimentální měření za simulovaných klimatických podmínek a stanovit změnu deformace.

## **ANOTATION**

This thesis is elaborated on the theme, analysis of the behavior of the warp weaving machine at different climatic conditions. The main task of this thesis is to describe the influence of climatic conditions on the deformation properties of warp yarn. The goal is to implement the experimental measurements under simulated climatic conditions and provide a change of deformation.

## **Klíčová slova**

Modul tuhosti	Rigidity module
Tkací stroj	Weaving machine
Osnovní nit	Warp yarn
Vibrační zařízení	Vibrating equipment
Frekvence protahování	Stretching frequency
Upínací délka	Clamping length
Klimatické podmínky	Climatic conditions
Měření	Measurement

# **OBSAH**

<b>ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>1.0 VZNIK TKANINY</b>	<b>11</b>
<b>1.1 FUNKCE TKACÍHO STAVU</b>	<b>12</b>
<b>1.2 TKACÍ MECHANIZMY</b>	<b>12</b>
<b>1.3 OSTATNÍ MECHANIZMY</b>	<b>12</b>
<b>2.0 PROŠLUPNÍ ÚSTROJÍ</b>	<b>13</b>
<b>2.1 PARAMETRY PROŠOUPU</b>	<b>13</b>
<b>2.2 TECHNOLOGICKÉ ROZDĚLENÍ</b>	<b>14</b>
<b>3.0 NAMÁHÁNÍ OSNOVY V TKACÍM PROCESU</b>	<b>15</b>
<b>3.1 MĚŘENÍ TAHOVÝCH SIL OSNOVY PŘÍMO NA TKACÍM STROJI</b>	<b>15</b>
<b>4.0 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZPRACOVÁVANÝCH NITÍ</b>	<b>17</b>
<b>4.1 NAMÁHÁNÍ V TAHU</b>	<b>18</b>
<b>4.2 NAPĚTÍ</b>	<b>19</b>
<b>4.3 SPECIÁLNÍ TEXTILNÍ VELIČINY</b>	<b>20</b>
<b>4.4 MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ OSNOVNÍCH NITÍ</b>	<b>22</b>
<b>5.0 DEFORMACE</b>	<b>23</b>
<b>5.1 DEFORMACE OSNOVNÍ NITĚ V PROŠOUPU</b>	<b>24</b>
<b>5.2 ABSOLUTNÍ DEFORMACE</b>	<b>25</b>
<b>5.3 RELATIVNÍ DEFORMACE</b>	<b>25</b>
<b>5.4 ELASTICKÁ DEFORMACE</b>	<b>26</b>
<b>5.5 DEFORMACE IDEÁLNĚ VISKÓZNÍCH MATERIÁLŮ</b>	<b>28</b>
<b>5.6 VISKOELASTICKÁ DEFORMACE</b>	<b>29</b>
<b>5.7 PLASTICKÁ DEFORMACE</b>	<b>31</b>
<b>6.0 LINEÁRNÍ VISKOELASTICITA</b>	<b>32</b>
<b>7.0 CYKlickÉ NAMÁHÁNÍ</b>	<b>33</b>
<b>8.0 MODUL PRUŽNOSTI TEXTILIÍ</b>	<b>34</b>
<b>9.0 DYNAMICKO MECHANICKÉ VLASTNOSTI</b>	<b>36</b>
<b>9.1 ABSOLUTNÍ DYNAMICKÝ MODUL TUHOSTI</b>	<b>37</b>
<b>9.2 ELASTICKÝ ZTRÁTOVÝ MODUL TUHOSTI</b>	<b>37</b>
<b>9.3 ZTRÁTOVÝ ÚHEL</b>	<b>38</b>
<b>10.0 REOLOGICKÉ MODEL Y</b>	<b>39</b>



<b>10.1</b>	<b>HOOKOVSKÝ ELEMENT</b>	<b>41</b>
<b>10.2</b>	<b>NEWTONSKÝ ELEMENT</b>	<b>41</b>
<b>10.3</b>	<b>MAXWELŮV REOLOGICKÝ MODEL</b>	<b>43</b>
<b>10.4</b>	<b>KELVINŮV REOLOGICKÝ MODEL</b>	<b>43</b>
<b>11.0</b>	<b>KLIMATICKÉ PODMÍNKY</b>	<b>44</b>
<b>11.1</b>	<b>CHARAKTERISTIKA VLHKOSTI</b>	<b>44</b>
<b>11.2</b>	<b>VLHKOST VZDUCHU NA ZEMI</b>	<b>44</b>
<b>11.3</b>	<b>ROZDĚLENÍ VLHKOSTI</b>	<b>44</b>
<b>11.4</b>	<b>VLHKOST VZDUCHU A RELATIVNÍ VLHKOST VZDUCHU</b>	<b>45</b>
<b>12.0</b>	<b>VLIV KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA TEXTILNÍ MATERIÁL</b>	<b>45</b>
<b>12.1</b>	<b>VLIV SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ</b>	<b>46</b>
<b>12.2</b>	<b>VLIV VLHKOSTI</b>	<b>46</b>
<b>12.3</b>	<b>VLIV TEPLoty</b>	<b>49</b>
<b>12.4</b>	<b>VLIV TEPLoty PROSTŘEDÍ NA ZÁVISLOST <math>\sigma = f(\epsilon)</math></b>	<b>50</b>
<b>12.5</b>	<b>VLIV VLHKOSTI NA VISKÓZOVÁ VLÁKNA</b>	<b>51</b>
<b>12.6</b>	<b>FAKTORY KTERÉ OVLIVŇUJÍ POŠKOZENÍ TEXTILNÍCH VLÁKEN</b>	<b>52</b>
<b>13.0</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>52</b>
<b>13.1</b>	<b>TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY</b>	<b>53</b>
<b>13.2</b>	<b>POUŽITÝ MATERIÁL</b>	<b>53</b>
<b>13.3</b>	<b>MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ</b>	<b>53</b>
<b>14.0</b>	<b>VLASTNÍ MĚŘENÍ</b>	<b>54</b>
<b>14.1</b>	<b>ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ</b>	<b>55</b>
<b>14.2</b>	<b>MĚŘENÍ ZA BĚŽNÝCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK</b>	<b>57</b>
<b>14.3</b>	<b>MĚŘENÍ ZA KLIMATIZOVANÝCH PODMÍNEK- ZVÝŠENÁ TEPLota</b>	<b>57</b>
<b>14.4</b>	<b>MĚŘENÍ ZA KLIMATIZOVANÝCH PODMÍNEK - SNÍŽENÁ TEPLota</b>	<b>58</b>
<b>15.0</b>	<b>ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ</b>	<b>59</b>
<b>15.1</b>	<b>DYNAMICKÝ MODUL</b>	<b>59</b>
<b>15.2</b>	<b>FÁZOVÉ POSUNUTÍ</b>	<b>60</b>
<b>15.3</b>	<b>HYSTEREZE</b>	<b>61</b>
<b>16.0</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>63</b>

## **SEZNAM SYMBOLŮ**

A	amplituda periodické funkce
C	modul tuhosti nitě [N/m]
E	modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [Pa]
H	hystereze [mN.mm]
L	zvětšená délka prošlupu [mm]
$L_1$	zvětšená délka předního prošlupu [mm]
$L_2$	zvětšená délka zadního prošlupu [mm]
L	délka prošlupu [mm]
$l_1$	délka předního prošlupu [mm]
$l_2$	délka zadního prošlupu [mm]
S	plocha [m <sup>2</sup> ]
F	tahová síla [N]
$F_1$	tahová síla [N]
$F_2$	tahová síla [N]
$F_h$	tahová síla [N]
$F_m$	tahová síla [N]
$F_{max}$	maximální tahová síla [N]
t	čas [m/s]
v	rychlost [m/s <sup>2</sup> ]
$\alpha$	úhel prošlupu [rad]
l	protažení nitě (deformace) [mm]
$\Delta l$	protažení [mm]
$\varepsilon$	relativní deformace [%]
$\eta$	dynamická viskozita [Ns/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	normálové napětí [Pa]
$\tau$	tečné napětí [Pa]
$\delta$	fázový posuv [stupeň]
$\omega$	úhlová frekvence [rad/s]
tg $\alpha$	směrnice přímky

## Úvod

Tkaní je technologický postup výroby plošných textilií (tkanin), který spočívá v opakovaném provazování (křížení) dvou soustav nití. Podélná soustava se nazývá osnova a příčná útek. Způsob, jakým je překřížení soustav provedeno, se nazývá vazba. Nástrojem k výrobě tkanin je tkalcovský stav, který se vyvinul z jednoduchého tkalcovského rámu v minulosti. Vynálezem tří základních mechanismů, vytvoření prošoupu, prohození člunku a přírazu útku, byly vytvořeny podmínky k sestavení tkacího stroje, ruční pohon pak mohl být nahrazen pohonem motorickým. V dalším vývoji se stavy vybavovaly dalšími prvky, které tkací proces stále více automatizovaly a zrychlovaly. Důsledkem toho jsou i vyšší nároky na kvalitu nití, které se v tkacím procesu používají a studium jejich mechanických vlastností, kterými se zabývá i tato práce. Budou zde formulovány teoretické předpoklady o způsobu namáhání osnovních nití na tkacím stroji a vlivu klimatických podmínek, na deformační vlastnosti osnovních nití, během tkacího procesu. Vhodným experimentem budeme realizovat měření, která umožní analyzovat deformační vlastnosti osnovní nitě při různých klimatických podmínkách.

## 1.0 Vznik tkaniny

Základní pojmy z technologie tkaní :

**tkanina** – plošná textilie vytvořená vzájemným provázáním osnovních a útkových nití

**osnova** – soustava podélných nití odvíjených z osnovního válu

**útek** – nit kolmá k osnovním nitím

**vazba tkaniny** – způsob vzájemného provázání

**osnovní vazný bod** – bod překřížení útkové a osnovní nitě, osnovní nit leží na útkové

**útkový vazný bod** – útek leží v místě překřížení na osnovní niti

**střída vazby** – taková část vazby, která se v celé ploše tkaniny pravidelně opakuje

Tkanina vzniká provazováním dvou soustav křížících se nití. Osnovní nitě vcházejí do tkacího procesu v plném počtu uloženy rovnoběžně vedle sebe. Útkové nitě se vkládají do osnovy postupně. Cyklus tkaní se skládá ze čtyř základních fází.

- otevření prošlupu

Každá osnovní nit je navedena do jedné nitěnky. Skupina nitěnek je zavěšena v rámu a celek tvoří tkací list. Pro nejjednodušší plátnovou vazbu tkaniny jsou nutné minimálně dva tkací listy. Všechny liché osnovní nitě jsou navedeny do prvního listu a všechny sudé osnovní nitě jsou navedeny do druhého listu. Může se tkát i na čtyřech listech, které se pohybují ve dvojicích. Husté plátnové vazby se tkají šesti až osmi listy. Vertikálním pohybem tkacích listů se v osnově vytvoří klínový prostor, zvaný prošlup.

- zanesení útku

Do prošlupu se pomocí zanášeče například člunkem, skřipcem, jehlou, proudem vzduchu, do celé šířky osnovy vloží útková nit.

- zavření prošlupu

Po zanesení útku se tkací listy pohybují opačným směrem a procházejí základní polohou, kdy jsou v zástupu. V dalším pohybu tkacích listů se osnovní nitě za zaneseným útkem překříží, aby se při následujícím přírazu útek ve tkanině upevnil.

- příraz útku

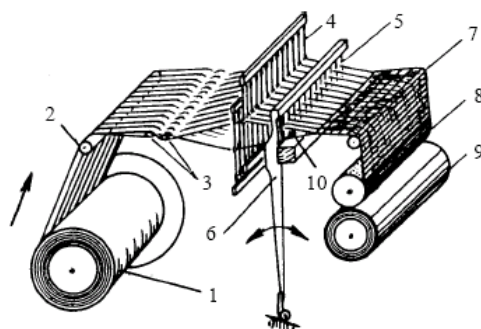
Zanesený útek se paprskem zatlačí k čelu tkaniny.

- Pro vytvoření tkaniny jsou nutné tři nástroje:

1. Nitěnky, které vytvářejí prošlup.
2. Zanášeč, který protáhne útek osnovou.
3. Paprsek, který přiřazuje poslední zanesený útek do tkaniny.

### 1.1 Funkce tkacího stavu

Osnova je navinuta na osnovním válu 1, ze kterého se odvíjí přes osnovní svůrku 2 do tkací roviny. Pořadí a rozdělení osnovních nití zajišťují



Obr. 1 Schéma tkacího stroje dle [5]

křížové činky 3. Osnovní nitě jsou navedeny jednotlivě do nitěnek 4. Soubor všech nitěnek ve společném rámu tvoří list. Soustava všech listů se nazývá brdo. Funkcí brda je vytvářet prošlup – tj. rozdělovat osnovní nitě do dvou rovin a vytvořit klínový prostor (prošlup), do kterého je zanášen útek 10. Paprsek 5 udržuje osnovní nitě v požadované šířce a zajišťuje stejnou hustotu

osnovních nití. Po prohození útku do prošlupu se pohybuje paprsek směrem ke tkanině a přiřazuje útek paprskem na bidlo 6. V době přiřazu útku se prošlup uzavírá a začíná se tvořit nový prošlup pro další útek. Postupně vznikající tkanina je odváděna z tkací roviny přes prsník 7 drsným válcem 8 a navíjí se na zboží 9. [5]

### 1.2 Tkácí mechanismy

Pracovní nástroje tkaní jsou tkací listy, zanášeč útku a paprsek, do pohybu jsou uváděny samostatnými mechanismy, vzájemně synchronizovanými. K pohybu tkacích listů slouží prošlupní mechanismus. Pro jednoduché vazby tkanin je to vačkový mechanismus, který pomocí pákového převodu pohybuje tkacími listy. Pro složitější vazby se používá programově řízený listový nebo žakárský stroj. Zanášeč útku pohání vačka, pružina, stlačený vzduch, popřípadě je poháněn i jiným způsobem. Na tryskových stavech se útek do prošlupu zanáší

proudem vzduchu, nebo kapaliny. Pohyb paprsku je odvozen z kloubového nebo vačkového mechanismu. [5]

### **1.3 Ostatní mechanismy**

Osnovu do tkacího procesu uvolňuje osnovní regulátor. Tkaninu odebírá zbožový regulátor. Celistvost nití kontrolují zarážky osnovní a útková, které při přetrhu nití stroj zastaví. Celý stroj pohání elektromotor, v současné době se používají frekvenčně řízené, nebo stejnosměrné elektromotory, které umožňují plynulou regulaci otáček stroje. Dále jsou na stavu různá čidla, která při nesprávné funkci kontrolovaného mechanismu stroj zastaví. [1]

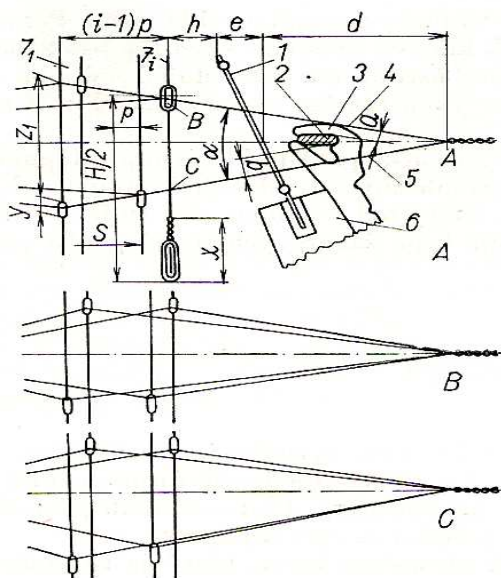
## **2.0 Prošlupní ústrojí**

Prošlupní ústrojí zajišťuje první fázi pracovního cyklu tkaní. Pomocí nitěnek rozevírá osnovu a vytváří tak klínový prostor pro zanesení útku. Technická úroveň prošlupního ústrojí má rozhodující význam nejen pro kvalitu tkaniny, ale také pro výkon tkacího stavu a má vliv na rozsah jeho využití. [1]

### **2.1 Parametry prošoupu**

V klínovém prostoru ABC, vytvořeném horní částí osnovních nití 4 a dolní částí osnovních nití 5, musí být jednotlivé osnovní nitě v zákrytu, chceme-li, aby byl vytvořený prošlup čistý. Proto se zdvih jednotlivých tkacích listů zmenšuje ve směru pohybu osnovy k paprsku. V části od tkacího listu k úběžnému bodu, který je za čínkem, nejsou osnovní nitě v zákrytu. Pořadí tkacích listů se označuje ve směru pohybu osnovy. První list  $7_1$  je tedy ten, který je nejbližší osnovnímu válu. Jeho maximální zdvih je dán rovnicí

$$Z_1 + y \leq 2[d + e + h + (i - 1)P] \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (mm) \quad (1)$$



Obr.2 Parametry prošlupu dle [5]

kde  $i$  je celkový počet tkacích listů a  $P$  je rozteč tkacích listů. Zdvih prvního listu musí být menší než volná délka poloviny nitěnky,

$$z_1 + y \leq \frac{H}{2} - x - \frac{y}{2} \quad (mm) \quad (2)$$

kde  $x$  je vzdálenost od závěsného oka nitěnky, kam až se mohou pohybovat osnovní nitě, aniž je odírá zakončení nitěnky,  $y$  je délka oka nitěnky. O tuto míru musí být skutečný zdvih tkacího listu větší, než je požadovaný zdvih osnovních nití. Do prošlupního klínu ABC se musí umístit paprsek 1 a zanášeč 2. Přitom musí být osnovní nitě 4 v horní části prošlupu vzdáleny o vzdálenost  $a$  ve spodní části o vzdálenost  $b$  od zanášeče. Na některých stavech je zanášeč veden po spodní části osnovy a tak  $b = 0$ . Přitom je paprsek v zadní krajní poloze ve vzdálenosti  $h$  od posledního tkacího listu  $z_i$ . Na většině bezčlunkových stavů je paprsek upevněn pouze za svou spodní část v nosníku 6. [5]

## 2.2 Technologické rozdělení

Z technologického hlediska rozeznáváme podle výše zobrazeného obrázku prošlup **A** – čistý, **B** – nečistý, **C** – poločistý a dále pak symetrický a asymetrický, jak je dále uvedeno. Prošlup čistý má všechny nitě při otevřeném prošlupu v zákrytu, zatím co poločistý prošlup má v zákrytu jen jednu větev prošlupu, zpravidla větev dolní. Nečistý prošlup má nitě výškově odstupňované v obou částech prošlupu. Čistý prošlup je výhodný pro každý prohoz. Zvláště u vodního prohozu je čistý prošlup velmi důležitý, neboť útek může na stěnu tvořenou osnovními nitěmi narazit, a jestliže je hladká, neprojeví se dotyk škodlivě. Naproti tomu

nečistý prošlup je výhodnější z hlediska zdvihu listů a napětí osnovy, neboť v prvních listech může být prošlup zmenšen a také příraz útku se rozloží. Symetrický prošlup je velmi výhodný v okamžiku prohozu, kdy obě větve mají stejné napětí, a naopak je ze stejného důvodu velmi nevýhodný v okamžiku přírazu. Velmi důležitá je také velikost prošlupu. V zásadě platí, že prošlup může být zmenšen pro hladké osnovy, například u hedvábí lze volit úhel prošlupu mezi 15 až 18°. U velmi nečistých vláken se nedoporučuje zvyšovat otevření prošlupu nad 25°, protože zdvih tkacích listů nejvíce vzdálených od přírazu by byl příliš velký. [4]

### **3.0 Namáhání osnovy v tkacím procesu**

V této kapitole si velmi obecně nastíníme jaké mechanické děje můžeme nalézt v osnovních nitích při jejich zpracování na tkacím stroji. Všechny děje zde popsané budou v následujících kapitolách podrobně popsány.

Osnovní nit, která se odvíjí z osnovního válu a vstupuje do tkacího procesu je ideálně napnutá na požadované napětí (označováno též jako předpětí osnovy) a následně je opakovaně namáhána tahem (napínána) a povolována na hodnoty předpětí. Nit je při těchto dějích mechanicky deformována. Mechanické charakteristiky osnovních nití mezi než patří i modul pružnosti, číselně vyjadřují jejich mechanické vlastnosti.

Napínací síla  $F$  je důležitou veličinou pro posouzení namáhání nití, při tkaní a to jak v osnově tak v útku. V osnově jsou důležitými hodnotami: nejvyšší napínací síla při přírazu paprsku, napínací síla při tvorbě prošlupu a během fáze otevírání prošlupu, napínací síla při otevřeném prošlupu nejen v horním, ale také ve spodním.

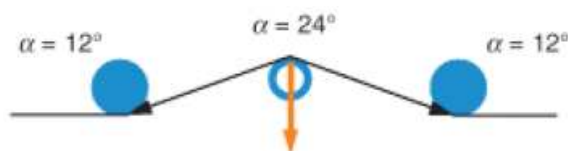
Nastavení optimálního poměru napínacích sil (což se děje seřízením geometrie prošlupu) se zdaří jen pomocí vysokofrekvenčního měření napínacích sil příze. Správně nastavená geometrie prošlupu je předpoklad pro dobrý chod tkacího stroje. Je bohužel teprve málo tkacích strojů, které tkalcí dovolí přesné, reprodukovatelné a přenosné nastavení geometrie prošlupu. Je-li to žádoucí, provádíme měření pohybů nitě a strojních elementů. K tomu se využívá indukční nebo laseroptický snímač. Také pomocí výkonného High Speed Video System (vysokorychlostního video systému) se mohou zaznamenat pohyby nití nebo jednotlivých elementů a prostřednictvím vhodného softwaru je analyzovat. Je-li to potřebné, je možné měřit i hladinu akustického tlaku, otěr a prašnost. [4]

### **3.1 Měření tahových sil osnovy přímo na tkacím stroji**

Kvantifikace a analýza tahového namáhání textilních materiálů v průběhu technologických operací patří mezi důležité měřicí úlohy. Tahové síly nití, tahové síly osnov a podobných

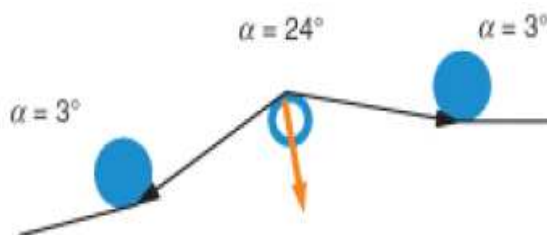


délkových textilních útvarů se měří nepřímo. Měřená nit nebo osnova se navádějí na trojici nit'ových vodičů. Nit přitom zaujímá polohu odvěsen rovnoramenného trojúhelníka a výslednice sil směřuje na prostřední nit'ový vodič, kterým je zakončen vhodný deformační člen obr. 3. [14]



Obr. 3 Použití snímače na rovném úseku nitě s obvyklými úhly opásání dle [14]

Někdy se s výhodou využívá technologické zalomení nitě ve stroji podle obr. 4, které zmenšuje úhel opásání u krajních nit'ových vodičů a tím i třecí odporové síly. Správným cejchováním snímačů lze vliv třecích sil na přesnost měření účinně potlačit .[14]



Obr. 4 Vložení snímače do místa zalomení nitě dle [14]

Ve Výzkumném ústavu textilních strojů Liberec a.s., byly vyvinuty snímače pro přesná dynamická měření tahových sil osnov, u kterých se současně měří tahové síly mnoha nití uspořádaných vedle sebe. V základním provedení snímače je délka měřicích trnů 50 mm. Trny jsou po jedné straně nebo po obou stranách držáku snímače. Měřicí rozsahy jsou do 200 N u jednostranného provedení, popř. do 300 N u oboustranného provedení. Senzor je jedním koncem uchycen na držáku a k opačnému konci je upevněn měřicí trn. Měřicí trn je v celé šíři zatížen osnovními nitěmi. Snímač dává správné výsledky měření, přestože silové zatížení senzoru není souměrné a výslednice sil působí v libovolném místě měřicího trnu. Senzor sám není citlivý na příčné a podélné vnější momenty, ale pouze na kolmé zatěžující síly. [14]



Obr.5 Měření tahové síly osnovy na tkacím stroji dle [14]

- Řešení pro měření a vyhodnocování periodických dějů.

Jejich průběhy jsou obvykle zaznamenávány podle úhlu pootočení hlavní hřídele. Jednotlivé průběhy a periody se často zobrazují v jednom záznamu za sebou nebo přes sebe. Nevýhodou zobrazení za sebou je snižování rozlišení detailů jednotlivých průběhů se zvyšováním jejich počtu v záznamu. Při záznamu přes sebe jsou na první pohled viditelné případné odchylky. Toho lze využít při seřizování strojů. Nové průběhy jsou tmavé, starší průběhy postupně zesvětlaží, až se úplně vytratí. Nicméně pro náš experiment je tento způsob měření nevhodný, a měření budeme realizovat na zcela jiném zařízení, podrobně bude vysvětleno v experimentální části. [14]

#### **4.0 Mechanické vlastnosti zpracovávaných nití**

Obsahem této kapitoly je osvojení si znalosti o vlivu mechanického namáhání na nitě, zkoušení pevnostních charakteristik nití a jejich významu pro technologické zpracování a užívání. Mechanické vlastnosti textilních materiálů jsou jejich odezvou na mechanické působení od vnějších sil. Mechanické vlastnosti se uplatní při zpracování vláken. Mezi důležité charakteristiky textilních materiálů patří jejich deformační chování, které je úzce spjato se strukturou textilních materiálů. Struktura a geometrie textilií je z velké části prozkoumána a dostatečně matematicky popsána. Mechanické vlastnosti a deformační děje jsou popisovány na základě vztahů získaných z praktických zkušeností a experimentálních výsledků. Popis a odhad jednotlivých deformačních vlastností je dostatečný, ale mechanismus a princip jakým k deformačním procesům dochází není stále zcela prozkoumán a přesný popis chování je spíše otevřenou problematikou.

- **Působení vnějších sil**

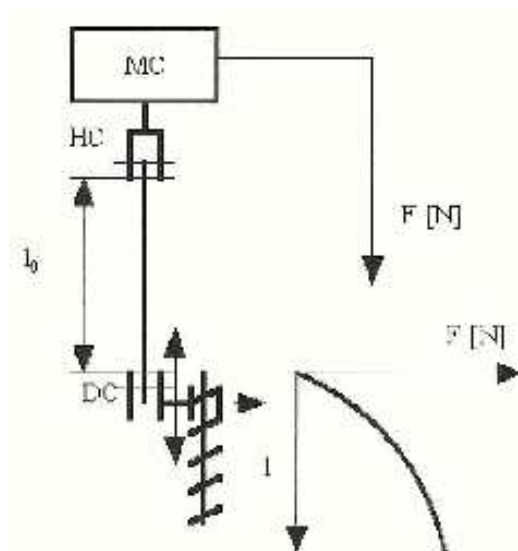
Mechanické vlastnosti nití se projevují jako odezva na mechanické namáhání prostřednictvím vnějších sil. Podle působení vnějších sil lze hovořit o namáhání na tah, tlak, ohyb a krut. Tyto druhy namáhání se většinou vyskytují v kombinaci (tah – příčné stlačení u vláken v zakrucované přízi). Laboratorně se tato namáhání zkoumají odděleně od sebe, přičemž normovány jsou pouze zkoušky pevnosti v tahu. Během mechanického namáhání dochází ve struktuře textilního vlákenného útvaru ke změně tvaru – deformaci, která je závislá na velikosti zatížení, rychlosti namáhání, době trvání. [11]

Mechanické vlastnosti jsou popisovány tzv. ultimativními charakteristikami.

- pevnost (síla do přetrhu)  $(P) = N$
- napětí do přetrhu  $(\sigma) = Pa$
- protažení do přetrhu  $(\Delta l) = mm$
- tažnost (deformace do přetrhu)  $(\varepsilon) = \%$
- relativní pevnost  $F_r$ , resp.  $f$   $(F_r) = N/tex, (f) = cN/dtex$
- tržná délka  $l_t$  – délka, při níž by se textilní vlákenný útvar zavěšený na jednom konci přetrhl vlastní tíhou  $(l_t) = km, \text{ resp. } (l_t) = m$

#### **4.1 Namáhání v tahu**

Při namáhání v tahu nazýváme odezvu materiálu pevností v tahu. Tuto vlastnost zkoušíme na dynamometru – přístroji pro definované namáhání vzorků, registraci síly a deformace (natažení). Přístroji se také říká trhací stroj nebo zjednodušeně trhačka. Vzorek je upnut do horní čelisti a spodní čelisti. Dolní čelist je spojena s pohybovým šroubem, který ji svým otáčením stahuje dolů (napíná vzorek) nebo zdvíhá (uvolňuje vzorek). Napětí, resp. síla, která je natahováním ve vzorku vyvíjena, je měřena měřícím členem. Natažení a jemu odpovídající síla je vykreslována do grafu závislosti pevnost – tažnost, který je též nazýván tahovou nebo též pracovní křivkou. To proto, že je obrazem práce, kterou jsme na napětí ve vzorku museli vynaložit. [11]



Obr. 6 Princip tahové zkoušky dle [11]

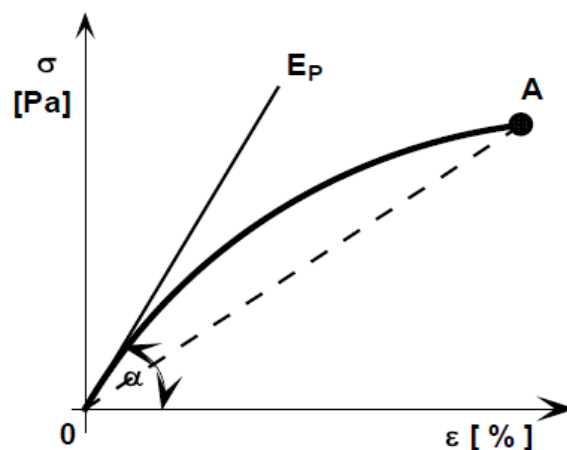
## 4.2 Napětí

Pod pojmem napětí rozumíme absolutní sílu  $F$  přepočítanou buď na plochu průřezu vlákna  $S$ , nebo na jemnost vlákna  $T$ . Přepočet absolutní síly na napětí se provádí proto, abychom mohli mezi sebou porovnávat různé materiály. Přepočet na plochu je obvyklý u homogenních materiálů (např. kovů), z nichž je možno vyrobit vzorek s přesně definovanou plochou průřezu. Napětí do přetrhu vzorku je nazýváno pevností v tahu.[11]

Pro textilní vlákenné útvary, které nemají přesně definovanou plochu průřezu, resp. jejich průřez je náhodně proměnná veličina, je nutno přepočítat absolutní sílu na veličinu, která je obrazem průřezu a tím je jemnost. Vyjádření napětí pro textilie bychom mohli spíše popsat jako relativní sílu (pevnost) podle vztahu [11]

$$f = \frac{F}{T} \quad (f) = N \cdot \text{tex}^{-1} \quad (3)$$

Pro popis mechanických vlastností je důležitý popis odolnosti v tahu (pevnosti) a deformační odezvy vláken (tažnosti). Informaci o tuhosti vlákna dává počáteční tangentový modul  $E_p$  a spojnice počátku s koncem tahové křivky (sekantový modul mezi body 0-A). [11]



Obr. 7 Hookov zákon dle [11]

#### 4.3 Speciální textilní veličiny

- **Jemnost** lineárních textilních útvarů vyjadřujeme poměrem mezi jejich délkou a hmotností.

$$T(tex) = \frac{m(g)}{l(km)} \quad (4)$$

- **Relativní (měrná) síla**  $F_r$ ,

$$F_r = f \frac{F}{T} \quad (F_r) = N \cdot tex^{-1} \quad (5)$$

$N \cdot tex^{-1}$  - vyjádření relativní měrné síly pro příze a nitě

- **Napětí**

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\sigma] = N \cdot m^{-2} = Pa \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F_r \rho S}{S} = F_r \cdot \rho \quad (7)$$

Ze vztahu plyne, že čím větší je hustota  $\rho$  ( $kg \cdot m^{-3}$ ), tím menší je relativní síla  $F_r$  ( $N \cdot tex^{-1}$ ) při stejném napětí  $\sigma$  (Pa).

- **Modul pružnosti v tahu**

Modul pružnosti

$$E = \sigma / \varepsilon = \tan \alpha \quad (8)$$

Je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí, v oblasti malých deformací. Jednotkou modulu pružnosti jsou obvykle pascaly (Pa).[3]

- **Modul tuhosti nitě – C**

Modul definujeme obecně jako odpor materiálu proti změně tvaru. Na rozdíl od modulu pružnosti se týká celého tělesa, nikoliv jen materiálu, jímž je tvořeno. Modul tuhosti nitě C je definován vztahem. [10]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0} \quad (10)$$

$$F = \frac{E \cdot S}{l_0} \cdot \Delta l \quad (11)$$

$$C = F / \Delta l \quad (\text{jednotka } N.m^{-1}) \quad (12)$$

Kde F je velikost působící síly, S je plocha průřezu vlákna,  $\Delta l$  je rozdíl délek před protažením a po protažení. Určuje odolnost nitě proti protažení. [10]

- **Tržná délka**

Tržná délka je další textilní specifický způsob vyjádření poměrné (relativní) síly. Je definována jako délka, při níž se vlákno (nit, proužek textilie) přetrhne vlastní tíhou.

$$G = F = m_c \cdot g \quad (G) = kg \cdot m \cdot s^{-2} = N \quad (13)$$

kde  $m_c$  – je celková hmotnost textilie,  $g$  – je gravitační zrychlení [3]

#### **4.4 Mechanické namáhání osnovních nití**

Každý typ deformace jako tah, tlak, ohyb apod., kterým se těleso opakovaně namáhá, přechází na dynamickou zkoušku. Časově proměnné namáhání může mít cyklický (pravidelný) nebo acyklický (nepravidelný průběh).

Napětí, při kterém dochází k dynamickým namáháním a porušení materiálu, je podstatně menší, než hodnota získaná při statické zkoušce. Zvláště nebezpečné je namáhání takovou frekvencí, se kterou je namáhaný materiál v rezonanci. Vzniká pak "špičkové napětí", které několikanásobně převyšuje určité mezní dynamické napětí. Proto se pevnostní chování osnovních nití zkouší nucenými kmity při různých frekvencích a vyhodnocují se útlumové vlastnosti, kde rezonance se zvláště projevuje u polymerů s malou útlumovou schopností. Většina dynamických metod používá cyklického napětí nebo deformace sinusového průběhu. Narozdíl od strojařských materiálů, které jsou namáhány střídavě tahem a tlakem, je osnovní nit namáhána pouze na tah a povolována. [4]

Jestliže nejkratší doba cyklického děje, který se beze změny opakuje, je  $T$  - kmit (cyklus), pak převrácená hodnota  $1/T$  je kmitočet  $f$  (frekvence). Představuje počet cyklů za 1 sekundu a jednotkou je 1 Herz (1c/s). Napětí se mění cyklicky. Úhlovou rychlost  $\omega$  definujeme jako  $2\pi$  násobek kmitočtu. [3]

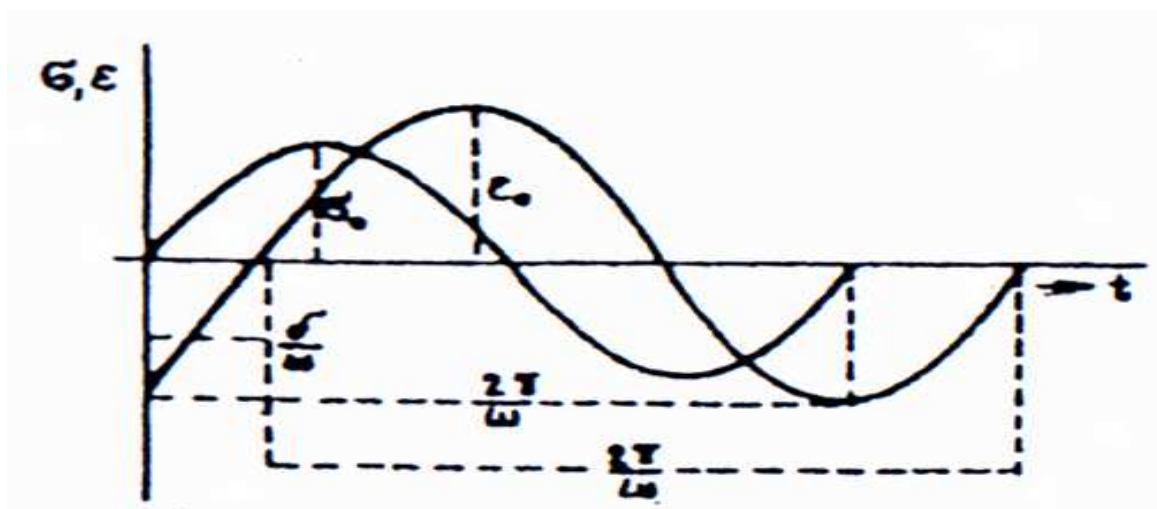
$$\omega = 2\pi f = 2\frac{\pi}{T} \quad (14)$$

Okamžité napětí  $\sigma$  v čase  $t$  se dá vypočítat z rovnice

$$\sigma_t = \sigma_0 \sin \omega t \quad (15)$$

kde  $\sigma_0$  je maximální hodnota výkmitu (amplitudy) napětí.

Působením napětí se ideálně elastické těleso deformuje. Při cyklickém sinusovém namáhání se bude i deformace měnit sinusově se stejnou frekvencí jako napětí a úměrnou deformací  $\epsilon_0$ . [3]



Obr. 8 Časová závislost cyklického napětí a deformace v jednom cyklu dle [15]

U viskoelastických látek se část energie dodané při každém cyklu ztrácí ve formě tepla a v důsledku toho je průběh deformace fázově posunutý za napětím o určitý fázový nebo ztrátový úhel  $\delta$ . Poměr amplitud mezi napětím (silou) a deformací je absolutní, dynamický, někdy označován též jako komplexní modul tuhosti  $C$  a jeho převrácená hodnota je absolutní poddajnost  $J$ . [15]

Při vektorovém znázornění veličin můžeme výkmit napětí rozložit na dvě složky. Jednu ve fázi s deformací, která představuje elastickou složku s dynamickým modulem  $C_{Re}$  a druhou složku mechanických ztrát, posunutou fázově o  $\pi/2$  ve směru deformace, označovanou jako ztrátový modul  $C_{Im}$ . Podrobně bude popsáno v následujících kapitolách. [15]

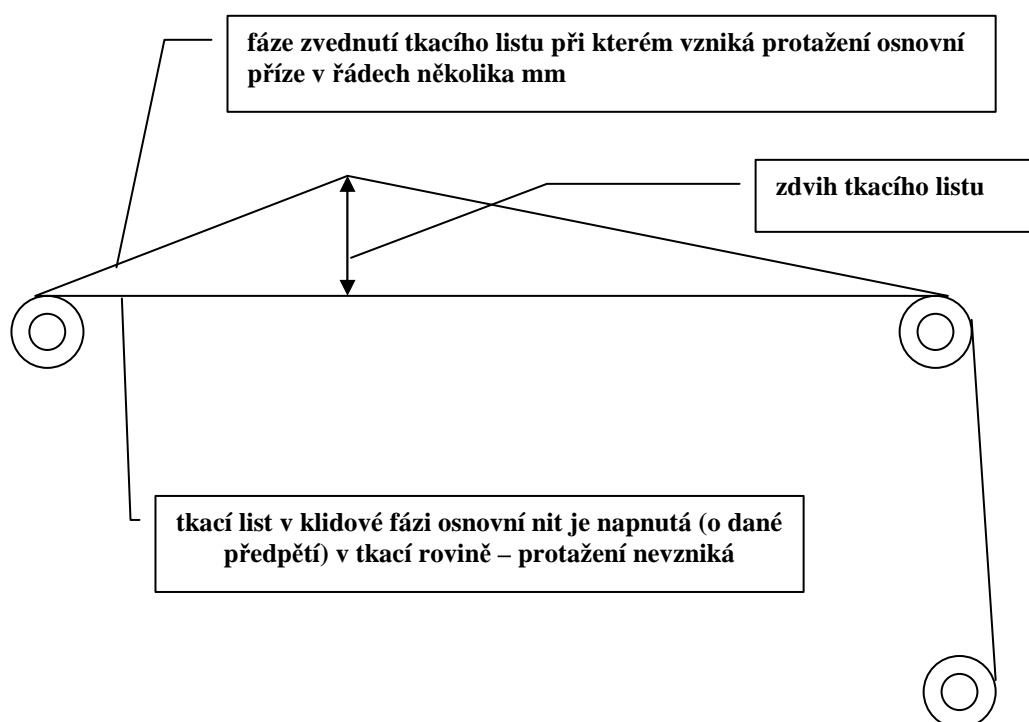
## 5.0 Deformace

Působením síly, teploty a vlhkosti na zkoušený vzorek textilie vznikají různé typy deformací. Pro nás jsou nejdůležitější deformace elastické (vratné), zotavené nebo také viskoelastické a plastické (nevratné). Celková deformace je vždy součtem deformace elastické, zotavené a plastické. Při natahování zkoušeného vzorku dochází k jeho prodloužení, čili deformování. Absolutní deformaci vyjadřujeme v absolutních jednotkách jako  $\Delta l$ . Má-li být deformace různých materiálů srovnávána, je ji nutno podobně jako u napětí přepočítat na relativní jednotky. Nebudeme-li vyjadřovat deformaci v %, bude vyjádřena jako bezrozměrné číslo.[3]

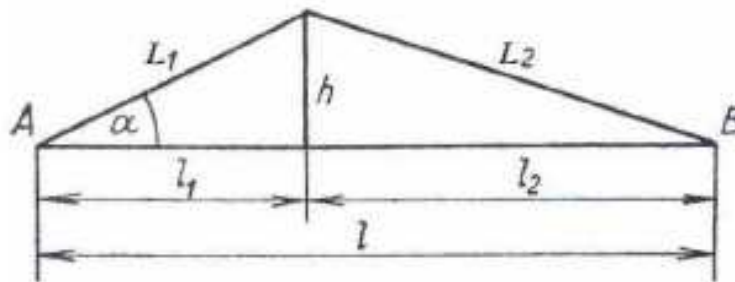


Pro naše studium namáhání osnovních nití v tkacím procesu nás bude zajímat zejména oblast pružných-viskoelastických deformací. V této oblasti Hookova zákona se osnovní nit namáhá během tkacího procesu a to zejména ve fázi vytváření prošoupu. Během vytváření prošoupu se osnovní příze, navedená do nitěnek, které jsou umístěné v tkacím listu, zvedá v řádech desítek milimetrů, konkrétně u tkacího stroje Pianol, který je k dispozici v laboratořích KTT činí zdvih tkacího listu zhruba 60 mm, při tomto zdvihu je osnovní příze protažena zhruba o 10 mm. Tato problematika je velice důležitá, a to z několika hledisek, jako jsou optimální seřízení tkacího stroje, zbytečně vysoké předpětí v osnovních přízích, malé předpětí osnovních přízí, špatná kvalita produkované tkaniny a tak dále. Na následujícím obrázku je zobrazen vznik protažení v prošoupu.

### 5.1 Deformace osnovní nitě v prošoupu



Obr. 9 Vznik protažení osnovní příze během otevírání prošoupu



Obr.10 Geometrie prošoupu dle [5]

Při otevírání prošoupu dochází k protažení přízí o délku  $\Delta l$  a platí tyto vztahy:

$$L = L_1 + L_2 = l + \Delta l \rightarrow l = l_1 + l_2 \rightarrow \Delta l = L_1 + L_2 - l_1 - l_2 \quad (16)$$

Z pravoúhlých trojúhelníků vyplývá

$$L_1 = \sqrt{l_1^2 + h^2} \rightarrow L_2 = \sqrt{l_2^2 + h^2} \quad (17)$$

Po dosazení do vztahů dostaneme výraz

$$\Delta l = \sqrt{l_1^2 + h^2} + \sqrt{l_2^2 + h^2} - l_1 - l_2 \quad (18)$$

Který vyjadřuje závislost prodloužení  $\Delta l$  na výšce prošoupu  $h$  a délce přední části  $l_1$  a zadní části  $l_2$  prošoupu. [2]

## 5.2 Absolutní deformace

Pro přepočet deformace používáme následující vztahy:

$$\Delta l = l - l_o \quad (\Delta l) = mm \quad (19)$$

kde  $l$  – je konečná délka po natažení  $(l) = mm$ ,  $l_o$  – je počáteční (původní) délka vzorku  $(l_o) = mm$ , tzv. upínací délka.

## 5.3 Relativní deformace

$$\varepsilon = \frac{\Delta l(mm)}{l_o(mm)} = \frac{l - l_o}{l_o} \quad (\varepsilon) = \% \quad (20)$$

Relativní deformaci do přetrhu nazveme tažnost. Při zkoušení mechanických vlastností jde většinou o zjištění meze pevnosti. Nit je v těchto zkouškách zatěžována až do destrukce - přetrhu vzorku. Výsledkem jsou ukazatele ultimativních pevnostních charakteristik. Aby se vyrovnalo např. zkroucení nitě, zatěžujeme nit před vlastní zkouškou základní malou silou  $F_0$ , nazývanou předpětí. [3]

Jak bylo již uvedeno výše, na vzorku upnutém za určitého předpětí  $F_0$  do čelistí dynamometru vzdálených o upínací délku  $l_0$  se při namáhání příze projeví absolutní deformace  $\Delta l$ . Absolutní deformaci (protažení) je lépe vyjádřit v relativních poměrech jako poměrné prodloužení (tažnost, deformaci):

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 10^2 \quad (\varepsilon) = \% \quad (21)$$

Deformaci popisujeme jako vratnou - elastickou a nevratnou - plastickou. Elastické - vratné deformace lze očekávat pouze v oblasti malých sil a deformací, kde průběh  $F = f(\Delta l)$  je lineární. U kovových materiálů je tato závislost popisována Hookeovým zákonem a vyjádřena Youngovým modulem pružnosti. [3]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\sigma) = Pa \quad (22)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (E) = Pa \quad (23)$$

Tato definice modulu pružnosti se u textilních struktur nedá použít. Neplatí totiž  $\sigma = F/S$ , protože plocha průřezu vláken-přízí není přesně definována. [11]

#### **5.4 Elastická deformace**

Elastická deformace je dokonale vratná. Závisí na velikosti síly  $F$ , na čase  $t$  (čase zotavení). Při sejmutí zátěže ze vzorku se projeví okamžitě a na vzorku nezanechává patrné poškození. Ideálně elastický materiál je takový druh materiálu, u kterého veškerá energie akumulovaná v materiálovém vzorku při jeho zatížení je zpětně využita při odlehčení tohoto vzorku. Nedochází tedy u těchto materiálů k žádné přeměně mechanické energie v teplo. Z tohoto

důvodu jsou napětí a poměrná deformace ve fázi a fázový posun  $\delta$  mezi napětím a poměrnou deformací nulové ( $\delta = 0$ ). Dále je zřejmé, že napětí a poměrná deformace se mění harmonicky se stejnou kruhovou frekvencí  $\omega$ . Chování ideálně elastického materiálu popisují následující rovnice. [6]

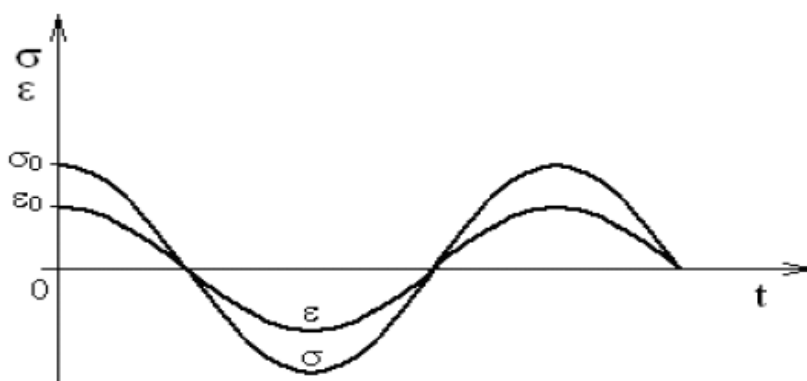
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \sigma_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (24)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) = \varepsilon_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (25)$$

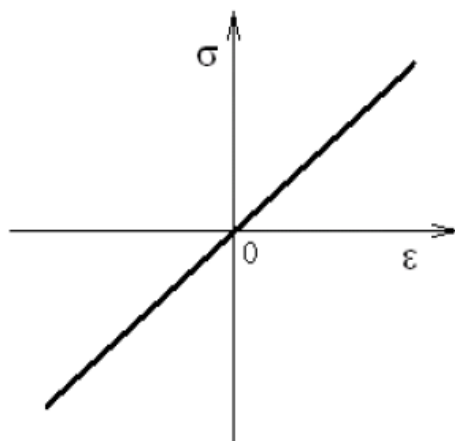
kde  $\sigma_0$  je amplituda napětí,  $\varepsilon_0$  je poměrná deformace,  $t$  je čas,  $\omega$  je kruhová frekvence a  $f$  je frekvence kmitání. U ideálně elastických materiálů platí Hookův zákon, při kterém je lineární závislost mezi napětím a poměrnou deformací,

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (26)$$

kde  $E$  je konstanta úměrnosti, tzv. Youngův modul pružnosti v tahu materiálu.[6]



Obr.11 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně elastického materiálu dle [6]



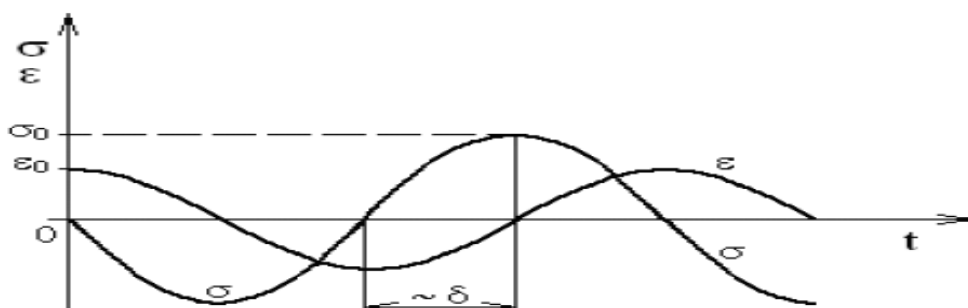
Obr.12 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů dle [6].

### 5.5 Deformace ideálně viskózních materiálů

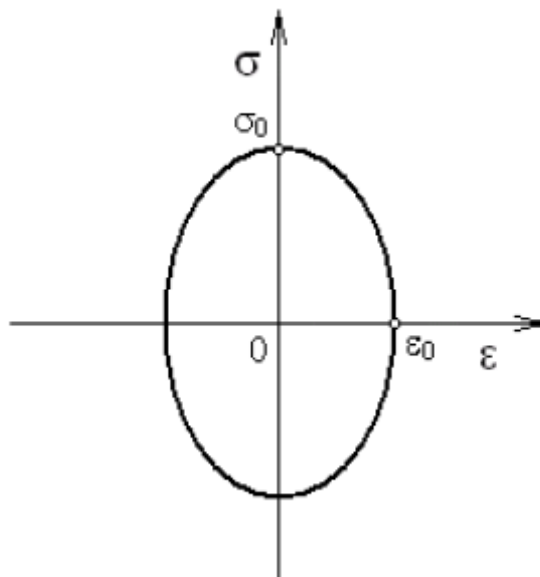
Ideálně viskózní materiály se chovají úplně naopak při harmonickém namáhání ve srovnání s čistě elastickými materiály. Veškerá energie vložená v materiálovém vzorku při jeho zatížení se přemění v teplo. Nedochází tedy k žádnému zpětnému využití vložené mechanické energie při odlehčení tohoto vzorku. Napětí a poměrná deformace nejsou u těchto materiálů ve fázi. Napětí předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun mezi těmito dvěma veličinami  $\delta = \pi/2$ . Chování viskózních materiálů popisují tyto rovnice. [6]

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi/2) = -\sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (27)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (28)$$



Obr.13 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně viskózních materiálů dle [6]



Obr.14 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně viskózních materiálů dle [6]

Jak je zřejmé, u viskózních materiálů neplatí Hookův zákon na rozdíl od elastických materiálů. V tomto případě je závislost mezi napětím a poměrnou deformací dána uzavřenou křivkou ve tvaru elipsy.[6]

## 5.6 Viskoelastická deformace

Viskoelastická materiálu souvisí se schopností materiálů tlumit mechanické vibrace. Vezměme harmonické dynamické namáhání materiálu v oblasti elastických deformací. Při takovém namáhání se napětí i poměrná deformace všeobecně mění s časem. Poměrná deformace  $\varepsilon(t)$  má přitom určité fázové zpoždění vůči působícímu napětí  $\delta(t)$ . Je to způsobeno strukturálním tlumením materiálů, při kterém dochází k částečné přeměně vložené mechanické energie v teplo. V tomto případě se jedná o vnitřní tlumení materiálů. Množství přeměněné energie je měřítkem strukturálního tlumení. Z hlediska přeměny energie při dynamickém namáhání se rozdělují materiály na elastické, viskoelastické a viskózní. [11]

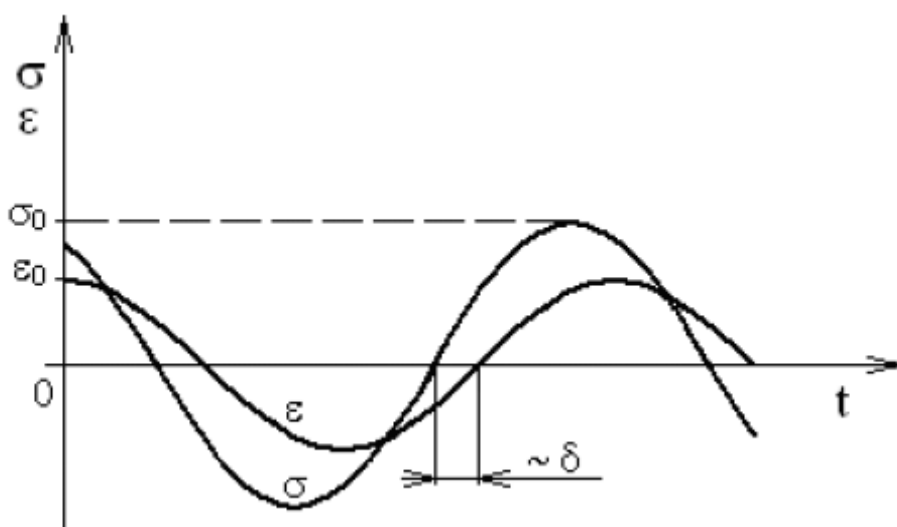
Viskoelastické materiály jsou přechodovou oblastí mezi ideálně elastickými a viskózními materiály. Textilní vlákna ať přírodní či chemická jsou nejčastěji tvořena semikrystalickými polymery s oblastmi s různým stupněm uspořádanosti. Mnoho vlastností je pak ovlivněno touto částečně krystalickou strukturou, která je tvořena svazky fibril a ty jsou tvořeny mikrofibrilami, jenž jsou vzájemně propojeny vaznými řetězci. V mikrofibrilách se pravidelně

střídají amorfni a krystalické oblasti. Při mechanickém namáhání pod mezí kluzu se krystalický podíl chová elasticky a amorfni podíl se projevuje viskózním tokem. Textilní vlákna jsou tedy viskoelastická a oba typy chování se v nich projevují současně. Většina reálných látek je při namáhání charakterizována jak viskózním, tak i elastickým chováním. Jedná se především o přírodní a technické materiály (např. polymery, asfalty, mnoho typů biologických materiálů apod.). Chování viskoelastických materiálů je schématicky znázorněno na níže zobrazeném obrázku. Podobně jako u viskózních materiálů je mezi napětím a deformací určitý fázový posun. Napětí tedy předbíhá poměrnou deformaci, přičemž fázový posun mezi napětím a poměrnou deformací leží v intervalu  $\delta \in (0, \pi/2)$ . Pro napětí a poměrnou deformaci při viskoelastickém chování platí rovnice [6]

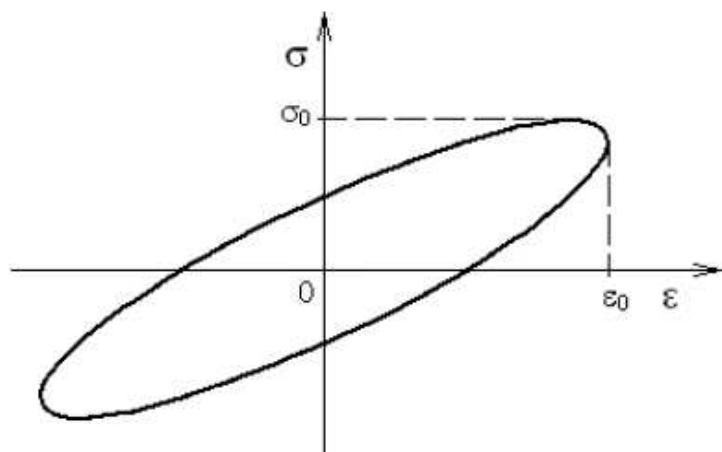
$$\sigma = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \quad (29)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (30)$$

Část vložené mechanické energie při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů se zpětně využije při následném odlehčení a zbytek energie se přemění v tepelnou energii. Tento proces je nevratný. Množství přeměněné mechanické energie v tepelnou energii je úměrné ploše hysterézní křivky, která udává závislost mezi napětím a poměrnou deformací v průběhu jednoho cyklu při harmonickém namáhání viskoelastických materiálů. Protože závislost mezi napětím a poměrnou deformací je nelineární, neplatí Hookův zákon u viskoelastických materiálů. [6]



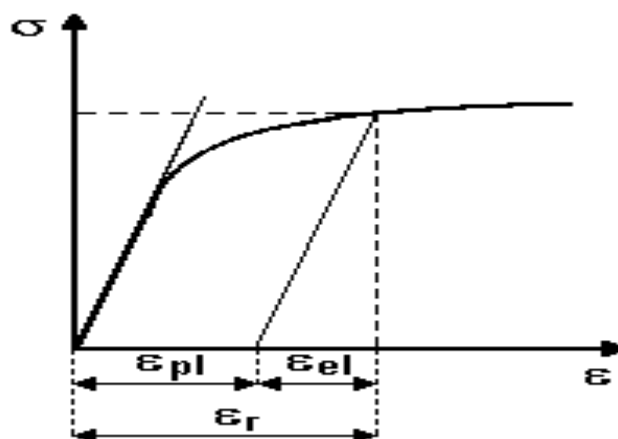
Obr.15 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů dle [6]



Obr.16 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů dle [6]

## 5.7 Plastická deformace

Při plastické deformaci jsou změny tvaru materiálu nevratné. Když přestane působit deformační síla, zůstane materiál zdeformovaný. Deformační křivka nese informaci o velikosti elastické i plastické deformace. Schematicky je to naznačeno následujícím obrázkem. [6]



Obr. 17 Deformační křivka dle [11]

Začátek deformační křivky (přímočará část) je znázorněním elastické deformace. Tato část je lineární (přímočará) – to znamená, že zde platí Hookův zákon. Další část křivky znázorňuje oblast napětí, která způsobují plastickou deformaci materiálu. Chceme-li zjistit velikost plastické deformace, vedeme rovnoběžku s počáteční lineární částí. Tato rovnoběžka protne osu v bodě, který umožňuje odečíst elastickou deformaci (v obrázku je označena  $\epsilon_{el}$ ) a plastickou deformaci ( $\epsilon_{pl}$ ). [11]



## 6.0 Lineární viskoelasticita

Jako viskoelastické jsou označovány takové materiály, které se za určitých okolností chovají jako vazké kapaliny a za jiných jako pružná tělesa. Použité slovo „okolnosti“ se vztahuje především k délce trvání deformačního procesu  $\Delta t$ (s) (délce pozorování) ve srovnání s materiálovým časem  $T$ (s), charakterizujícím pomíjivou paměť materiálu na jeho výchozí tvar. Obecně lze tyto okolnosti charakterizovat tzv. Debořiným číslem. [11]

$$De = T/\Delta t \quad (31)$$

Pro ideálně neelastické vazké kapaliny je  $T=0$ , tj.  $De=0$ , pro ideálně elastické materiály je  $T=\infty$ , tj.  $De=\infty$ . Při malých  $De$  se viskoelastické materiály chovají jako vazké kapaliny, při vysokých  $De$  jako pružná tělesa. [11]

Přísně vzato, všechny materiály jsou viskoelastické a při velmi rychlých změnách tvaru se i u plynů nebo vody projevují elastické vlastnosti. Odhady materiálových časů pro reálné viskoelastické materiály v následující tabulce jsou s hrubým zaokrouhlením převzaty z Tanerovy učebnice. [11]

Materiál	Teplota °C	Mater. čas $T$ (s)	Viskozita $\eta$ (Pas)	Tuhost $\eta / T$ (Pa)
voda	20	$10^{-12}$	$10^{-3}$	$10^9$
minerální olej	20	$10^{-9}$	1	$10^9$
polyethylen	220	$10^{-1}$	$10^{-1}$	$10^4$
polystyren	220	10	$10^5$	$10^4$

Tabulka 1 Odhady materiálových časů pro viskoelastické materiály dle [11]

To, že některé materiály jsou tradičně pokládány za kapalné a jiné za pevné, souvisí s tím, že je hodnotíme běžnými lidskými měřítky časových změn, tj. v rámci deformačních procesů, jejichž trvání jsou řádově vteřiny až minuty. Pouze u viskoelastických materiálů s materiálovými časy v tomto rozsahu jsou typické viskoelastické vlastnosti (relaxace napětí a creep) patrné na první pohled. Koncepce lineární viskoelasticity nabízí matematicky poměrně jednoduchý aparát dynamiky lineárních systémů pro unifikované a kvantitativní zpracování široké třídy reologických jevů za předpokladu lineární odezvy materiálu.[11]

## 7.0 Cyklické namáhání

Převážná většina materiálů a konstrukcí je namáhána časově proměnlivými silami, které mají povahu opakovaných účinků. Obecný případ s různě velkými výkmity sil a s různým charakterem jejich časové proměnlivosti nazýváme kmitovým namáháním. Je-li proměnlivost sil ustálena do stále stejných nejvyšších a nejnižších mezí při stejné frekvenci změn, jde o prosté cyklické namáhání, které je zvláštním případem namáhání kmitového. Se zřetelem k tomu, že kmitové namáhání lze složit superpozicí z řady jednoduchých cyklických namáhání o různé amplitudě a frekvenci, je pro porozumění změn, které proměnlivé účinky v tělesech vyvolávají, vhodné nejdříve sledovat ustálené cykly namáhání, a pak studovat zákony kumulace poškození vyvolaného superpozicí jednotlivých cyklických namáhání. Pokud síly vyvolávají jím úměrná napětí, je vhodné se zabývat dále časovým průběhem napětí. Analogicky se lze zabývat časovým průběhem poměrné deformace. Uzavřená změna napětí, která nabývá spojitě řady hodnot, se nazývá cyklus napětí. [3]

K hlavním charakteristikám napětíového cyklu patří

- Perioda cyklu, tj. čas, v němž proběhne uzavřená jednorázová změna napětí.
- Největší  $\sigma_h$  a nejmenší  $\sigma_d$  napětí cyklu, tj. krajní hodnoty napětí v průběhu jednoho cyklu.
- Střední napětí cyklu  $\sigma_m$

$$\sigma_m = 1/2 (\sigma_h + \sigma_d) \quad (32)$$

- Amplituda napětí cyklu, tj. polovina algebraického rozdílu krajních hodnot napětí cyklu

$$\sigma_a = 1/2 (\sigma_h - \sigma_d) \quad (33)$$

- Rozkmit napětí

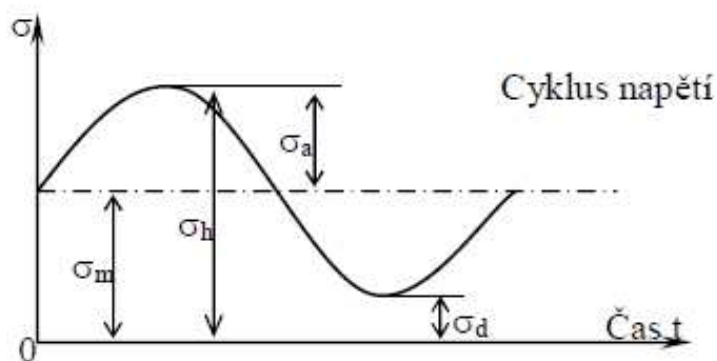
$$2\sigma_a$$

- Součinitel nesouměrnosti napětíového cyklu

$$R = \sigma_d / \sigma_h \quad (34)$$

Tento součinitel má pro střídavé souměrné napětí hodnotu  $R=-1$ , pro střídavé nesouměrné napětí  $-1 < R < 0$ , pro míjivé  $R=0$  a pro tepavé  $0 < R < 1$ . Uvedená napětí lze si představit jako napětí složená ze dvou částí:[3]

- a) Stálého (konstantního) napětí, rovného co do velikosti střednímu napětí cyklu  $\sigma_m$ .
- b) Proměnného (cyklického) napětí o velikosti amplitudy  $\sigma_a$ .



Obr.18 Cyklus napětí dle [15]

## 8.0 Modul pružnosti textilií

Modul pružnosti u textilií tedy nelze definovat tak, jak je definován Youngovým modulem. Vycházíme z toho, že modul pružnosti je první derivací funkce tahové (pracovní) křivky, jinými slovy tečna ke křivce v počátku. Většinou ji konstruujeme graficky, změříme úhel  $\alpha$  a vypočítáme  $\tan \alpha$ . Z výše uvedených důvodů také používáme u textilií místo pojmu Youngův modul pružnosti pojem počáteční tangentový modul  $E_p$ . [3]

Modul pružnosti lze definovat pro vlákna vztahem

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\varepsilon_p} = \frac{F_p \cdot l}{S \cdot \Delta l} \quad (35)$$

respektive tangentovým modulem pružnosti

$$E_t = \frac{f_p}{\varepsilon_p} \quad (36)$$

Celková deformace je tedy dána vztahem:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_e \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_p \quad (37)$$

kde:

$\varepsilon_c$  – celková deformace [%],

$\varepsilon_e$  – elastická deformace [%],

$\varepsilon_z$  – zotavená (viskoelastická) deformace [%],

$\varepsilon_p$  – plastická (trvalá) deformace [%]<sup>(1)</sup>

- **Komplexní modul pružnosti (E) je určený poměrem amplitud**

$$E = \sigma_0 / \varepsilon_0 \quad (38)$$

Bude-li docházet mezi působící silou a deformací ke zpoždění, bude dynamický modul závislý na frekvenci a bude docházet k hysterezi. Jedná se o tzv. komplexní modul. Komplexní dynamický modul, odvozený ze znázornění napětí a deformace v komplexní rovině.  $\sigma = \sigma^* e^{i\omega t}$   $\varepsilon = \varepsilon^* e^{i(\omega t + \delta)}$  je určený vztahem [3]

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E' + iE'' \quad (39)$$

Dynamický modul můžeme rozložit do dvou složek  $E_1$  reálnou,  $E_2$  imaginární.

$$E_1 = E_0 \cdot \cos \delta \rightarrow E_2 = E_0 \cdot \sin \delta \quad (40)$$

- $E_1$  je dynamický modul pružnosti, který je mírou ideálně pružné odolnosti proti mechanickému namáhání, souhlasné s fází namáhání. [3]
- $E_2$  je ztrátový modul, který je mírou mechanických ztrát v čase jednoho cyklu fázově posunutý o  $\pi/2$ . [3]

Pro vyjádření velikosti a fázového posunu plynou vztahy [3]

$$E^* = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \rightarrow \delta = \arctg (E_2 / E_1) \quad (41)$$

## 9.0 Dynamicko-mechanické vlastnosti

V této kapitole si podrobněji popíšeme komplexní dynamický modul tuhosti a s ním související veličiny. Textilní vlákenné útvary se v procesu zpracování jen málokdy namáhají silami limitně se blížícími jejich pevnosti. Velmi často na vlákna působí různé mechanické síly, které jsou menší než je jejich pevnost, ale vícenásobně se opakují. Působící napětí se mění s časem. Pro stanovení dynamických modulů tuhosti textilií je nutné realizovat experimentální měření s harmonickým průběhem výchylky budiče vibrací  $d(t)$ . [10]

$$d(t) = D_a \cdot \sin(\omega t) \quad (42)$$

$D_a$  – amplituda výchylky budiče vibrací (mm)

$\omega$  – úhlová frekvence (rad/s)

Tento průběh výchylky budiče vibrací vytvoří v předepjaté textilii harmonický průběh protažení  $\Delta l(t)$ . [10]

$$\Delta l(t) = D_a \cdot [1 + \sin(\omega t)] = \frac{\Delta L_{\max}}{2} \cdot [1 + \sin(\omega t)] \quad (43)$$

$\Delta L_{\max}$  – maximální protažení textilie (mm)

$$\Delta L_{\max} = 2 \cdot D_a$$

Protažení představuje budící funkci, která vyvolá v textilii odezvu v podobě harmonického průběhu tahové síly  $F(t)$ . [10]

$$F(t) = F_p + F_a [1 + \sin(\omega t + \delta)] = F_p + \frac{\Delta F_{\max}}{2} \cdot [1 + \sin(\omega t + \delta)] \quad (44)$$

$F_p$  – předpětí v textilii (mN)

$F_a$  – amplituda odezvy, tj. tahové síly (mN)

$\delta$  – vzájemné fázové posunutí mezi budící funkcí a odezvou, tj. ztrátový úhel (rad)

$\Delta F_{\max}$  - maximální změna tahové síly (mN)

Tahovou sílu v textilií (odezvu) můžeme vyjádřit součtem tří členů. [10]

$$F(t) = F_p + F_a + F_H(t) \quad (45)$$

Třetí člen výrazu  $F_H(t)$  představuje proměnlivou složku tahové síly, která se s časem mění harmonicky. [10]

$$Q_H(t) = Q_a \cdot \sin(\omega t + \delta) = \frac{\Delta Q_{\max}}{2} \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (46)$$

### **9.1 Absolutní (komplexní) dynamický modul tuhosti (C)**

Modul je určený jako poměr amplitudy proměnlivé složky odezvy a amplitudy proměnlivé složky budící funkce. [10]

$$C = \Delta F_{\max} / \Delta L_{\max} \quad (47)$$

*C – dynamický (komplexní) modul tuhosti (N/m)*

### **9.2 Elastický a ztrátový modul tuhosti**

Elastický modul tuhosti  $C_{Re}$  představuje reálnou část dynamického (komplexního) modulu tuhosti  $C$  a je mírou ideální odolnosti vůči mechanickému namáhání, shodnou s fází namáhání.[10]

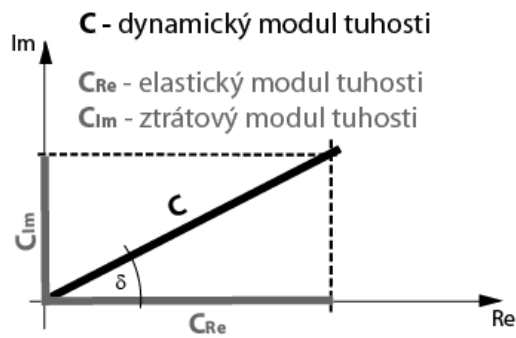
$$C_{Re} = C \cdot \cos(\delta) \quad (48)$$

$C_{Re}$  – elastický modul tuhosti čili reálná část dynamického modulu (N/m)

Ztrátový modul tuhosti  $C_{Im}$  představuje imaginární část dynamického (komplexního) modulu tuhosti  $C$  a je mírou mechanických ztrát během jedné periody, fázově posunutý o  $\pi/2$ . [10]

$$C_{Im} = C \cdot \sin(\delta) \quad (49)$$

$C_{Im}$  – ztrátový modul tuhosti čili imaginární část dynamického(komplexního) modulu (N/m)



Obr. 19 Charakteristika modulu tuhosti dle [10]

### 9.3 Ztrátový úhel – fázové posunutí

Ztrátový úhel vyjádříme pomocí energie v jedné čtvrtině periody, t.j v časovém intervalu od 0 do  $T/4$ . Jednu čtvrtinu periody můžeme vyjádřit tímto vztahem [10]

$$T/4 = \frac{\pi}{2\omega} \quad (50)$$

energie v jedné čtvrtině periody  $W$  je potom dána tímto integrálem

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} Q_H \cdot d\Delta l_H = \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} Q_H \cdot \frac{d\Delta l_H}{dt} \cdot dt = \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} Q_a \cdot \sin(\omega t + \delta) \cdot D_a \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \cdot dt = \\ &= \frac{1}{4} Q_a \cdot D_a \cdot [2 \cdot \cos(\delta) + \pi \cdot \sin(\delta)] = Q_a \cdot D_a \cdot \left[ \frac{\cos(\delta)}{2} + \frac{\pi \cdot \sin(\delta)}{4} \right] \end{aligned} \quad (51)$$

Tento integrál byl řešen pomocí programu Mathematika obdélníkovou metodou, další úpravou těchto vztahů, pomocí hystereze  $H$ , maximálního protažení  $\Delta L_{\max}$  a maximální změny tahové síly  $\Delta F_{\max}$ , která je uvedena v odborné literatuře, dostaneme vztah pro fázový posun: [10]

$$\delta = \arcsin \frac{H}{\frac{\varepsilon_{\max}}{2} * \frac{F_{\max}}{2} * \pi} \quad (52)$$

Dynamicko-mechanické vlastnosti a jejich závislost na klimatických podmínkách lze zjistit experimentálně na vhodném měřicím zařízení (budič vibrací, snímač, klimatizované prostředí). Veličiny dynamicko-mechanických vlastností jsou funkcí: [3]

- Podmínek měření
- Chemické struktury makromolekul
- Nadmolekulární struktury vláken
- Aditiv

Ze vztahů, které určují jednotlivé veličiny dynamicko-mechanických vlastností vyplývá, že jsou při normálních klimatických podmínkách funkcí statického napětí, dynamického napětí a frekvence. [3]

## **10.0 Reologické modely**

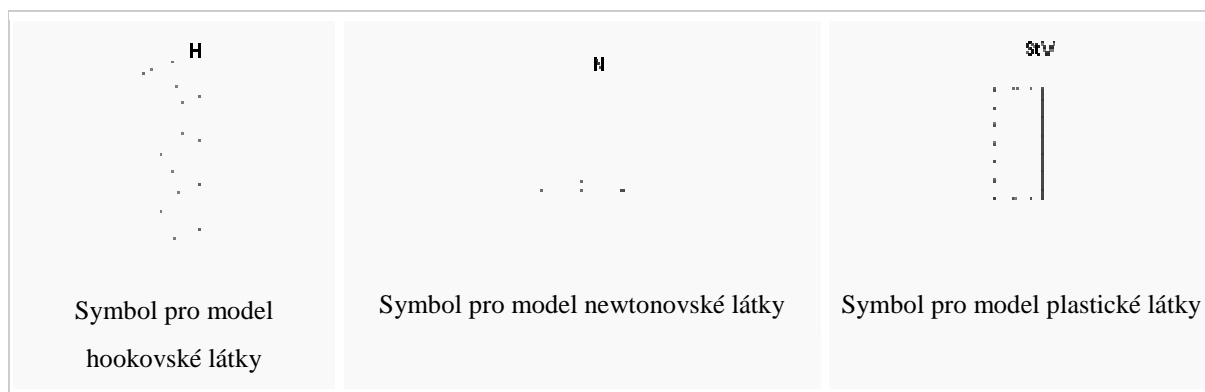
Reologie se zabývá obecnými mechanickými vlastnostmi látek, vztahy mezi napětím, deformacemi a rychlostí deformace a z toho u kapalin vyplývajícími dalšími hydrodynamickými vztahy. Souvislost mezi mikrostrukturou a reologickými vlastnostmi zkoumá mikrореologie. Pro potřeby chemického inženýrství má význam zejména fenomenologická reologie (makrореologie) kapalin, která na ně pohlíží jako na kontinuum a formuluje zákonitosti viskózního toku. Znalost základních reologických veličin, viskozity, meze toku a modulů pružnosti je potřebná nejen k charakterizování surovin eventuálně produktů, ale i k řešení mnoha technických úloh a inženýrských výpočtů při navrhování, zdokonalování a kontrole různých zařízení. [12]

K popisu chování látky určitého druhu se vytváří tzv. reologické modely. Mezi základní reologické modely patří model hookovské látky, který lze dobře využít při popisu kovových materiálů, přičemž reologické vlastnosti takové látky lze vyšetřovat pomocí teorie pružnosti. K popisu viskózních látek slouží model newtonovské látky. Reologická klasifikace se obvykle neprovádí podle objemových, ale podle tvarových změn. Většinu reálných látek však lze pomocí těchto jednoduchých modelů popsat pouze přibližně a pouze v omezeném rozsahu namáhání. Velké množství látek nelze dokonce popsat pomocí jednoduchých modelů vůbec. Takové látky je pak nutno popisovat pomocí obecných reologických modelů. Obecné reologické modely obvykle vznikají jako kombinace několika základních členů popisujících určitou vlastnost. Základní reologické modely slouží především



k vyjádření charakteru sledovaných závislostí, a nikoliv k detailnímu popisu jejich průběhu. Charakter závislostí si lze často při různých druzích namáhání modelu představit bez řešení odpovídající reologické rovnice. Nejčastěji se při vytváření obecného reologického modelu omezujeme na kombinaci Hookova elastického členu (označovaného  $H$ ), Newtonova viskózního členu (označovaného  $N$ ) a plastického Saint-Venantova členu (označovaného jako  $StV$ ). [12]

Konstrukci modelu lze vyjádřit také pomocí kombinace grafických symbolů, které zastupují jednotlivé členy. Člen  $H$ , který reprezentuje hookovskou látku, je zobrazován symbolem pružiny. Člen  $N$ , který reprezentuje newtonovskou látku, je zobrazován symbolem pístu a člen  $StV$ , který reprezentuje Saint-Venantův člen, je zobrazován jako kvádr tažený po podložce. [13]



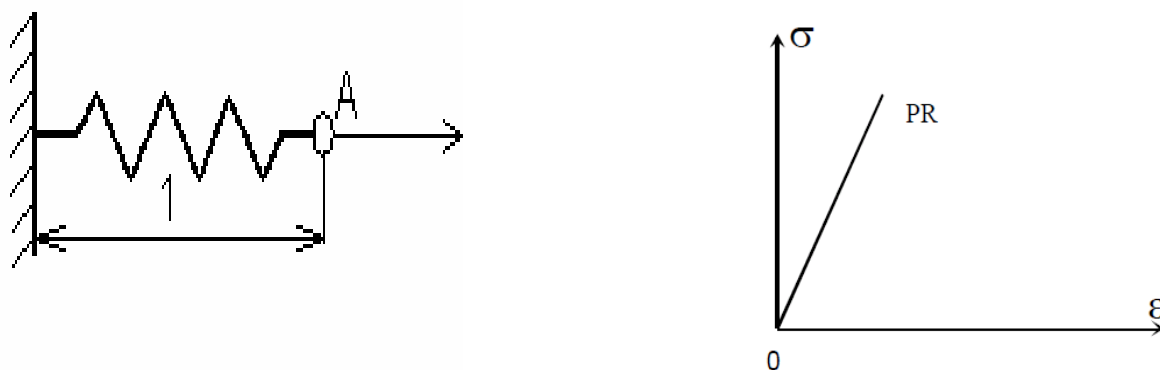
Obr. 20 Symboly reologických modelů dle [13]

Působení vnějších sil na jakékoliv těleso způsobuje uvnitř tělesa mechanické napětí. Obecná vnější síla může představovat jak ojedinělou sílu, tak spojitě zatížení na danou plochu či objem nebo působení dvojice sil (momentové zatížení). V libovolně vedeném myšleném řezu tělesem působí vektor napětí, který může být rozložen na normálovou a tečnou složku. V důsledku vnitřního napětí působícího v tělese, dochází k příslušné deformační odezvě závislé na mechanických vlastnostech materiálu. Pro intuitivní pochopení podstaty viskoelastické odezvy, významné především při sestavování strukturálních teorií viskoelastivity, jsou užitečné tzv. mechanické analogony materiálového chování (protažení je analogonem deformace, síla je analogonem napětí), jejichž reakce odpovídají popisu lineární dynamiky systémů prostřednictvím lineárních diferenciálních rovnic. Analogonem lineárně viskózního (newtonského) chování je tlumič, zobrazovaný jako píst ve válci naplněném vazkou kapalinou. Rychlost vytahování pístu je úměrná působící síle. [12]

Analogonem lineárně elastického (hookovského) chování je pružina, jejíž roztažení je úměrné působící síle. Jednoduché reologické modely jsou popsány několika málo konstantami. Spojováním jednotlivých členů do obecného reologického modelu roste počet konstant, které jsou nutné k vyjádření vlastností modelu. Pro složité reologické modely obsahují odpovídající reologické rovnice velký počet konstant a jsou složitě řešitelné. [12]

### 10.1 Lineárně elastický model materiálu – Hookovský element

Model je tvořen lineární Hookovskou pružinou, která popisuje pružnou deformaci materiálu působením síly, za předpokladu malých sil a malých deformací, které po odlehčení zmizí. Lze jej formulovat např. ve tvaru „deformace je úměrná napětí materiálu“. [12]



Obr. 21 Hookovská pružina a pracovní diagram dle [13]

Vyloučením času obdržíme závislost

$$\sigma = f(\varepsilon) = E \varepsilon \quad (53)$$

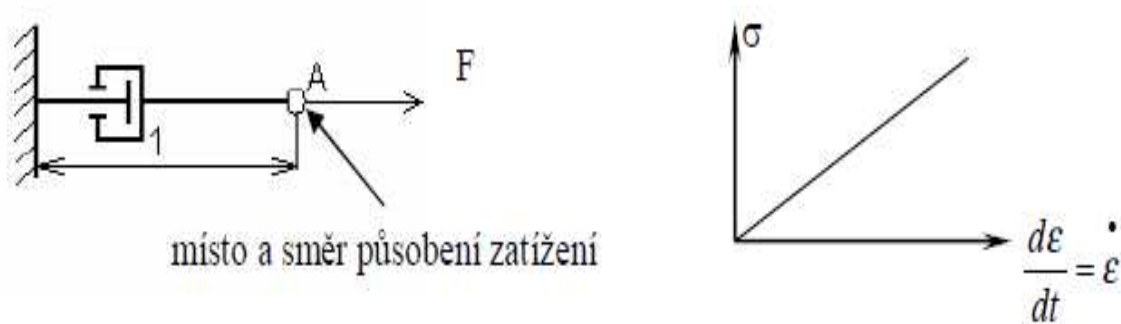
Tato závislost je označována jako Hookeův zákon. Konstanta úměrnosti  $E$  je označována jako Youngův modul pružnosti.

### 10.2 Ideálně viskózní model materiálu – Newtonský element

**Newtonská látka** je reologický model viskózní látky, která se řídí Newtonovým zákonem viskozity. Reologická rovnice newtonské látky je tedy charakterizována přímou úměrností

rychlosti deformace a napětí. Reologickou rovnicí je Newtonův zákon viskozity a materiálovou konstantou charakterizující danou newtonskou látku je viskozita. Model newtonské látky je vhodný především k popisu tekutin - hovoří se pak o **newtonské tekutině**, popř. o **newtonské kapalině**. [12]

Model je tvořen tlumičem s newtonovskou kapalinou.



Obr. 22 Model Newtonovské kapaliny a pracovní diagram dle [12]

Odpor pístu lineárně narůstá s růstem rychlosti posuvu pístu. V případě ideálně viskozního materiálu platí pro tečné napětí klasický Newtonův zákon

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (54)$$

kde součinitel  $\eta$  je dynamická viskozita charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny,  $du$  je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o  $dx$  a  $D$  je tzv. gradient rychlosti (rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině.

Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou, jejíž hodnota závisí na teplotě a tlaku. U plynů s teplotou roste, u kapalin naopak klesá. V soustavě SI je jednotkou pascal sekunda [ $\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$ ]. Dříve se udávala dynamická viskozita nejčastěji v poisech [P] nebo centipoisech [cP]. Platí  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$ . Převratná hodnota dynamické viskozity  $\varphi = 1/\eta$  se nazývá fluidita (tekutost).

Podíl dynamické viskozity  $\eta$  a hustoty tekutiny  $\rho$  se nazývá kinematická viskozita  $\nu = \eta / \rho$  [ $\text{m}^2 / \text{s}$ ]. Starší jednotkou je stok [St =  $\text{cm}^2 / \text{s}$ ], platí  $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů závisících jak na viskozitě tak na hustotě, např. při popisu

hydrodynamiky kapalin. Tekutiny řídící se Newtonovým zákonem se označují jako newtonské a jsou to zpravidla nízkomolekulární látky. [12]

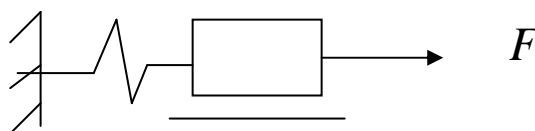
### 10.3 Maxwellův reologický model

Maxwellův model je sestrojen jako sériová kombinace viskózního a elastického elementu. Při sériové kombinaci jsou napětí všech elementů stejná, deformace (resp. jejich časové derivace) se sčítají. [12]

$$\sigma = \sigma_{Hook} = \sigma_{Newton}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{Hook} + \varepsilon_{Newton}$$

$$\frac{\delta.\varepsilon}{\delta.t} = \frac{\delta.\varepsilon_{Hook}}{\delta.t} + \frac{\delta.\varepsilon_{Newton}}{\delta.t} = \frac{1}{E} \frac{\delta.\sigma}{\delta.t} + \frac{\sigma}{\lambda} \quad (55)$$



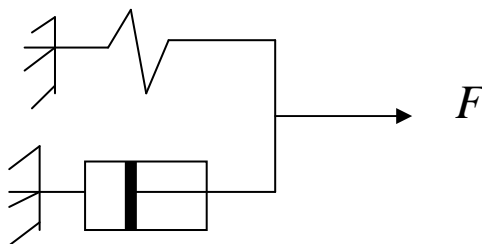
Obr. 23 Maxwellův model dle [13]

### 10.4 Kelvinův reologický model

Kelvinův model je sestrojen jako paralelní kombinace viskózního a elastického elementu. Při paralelní kombinaci jsou deformace (i jejich časové derivace) všech elementů stejné, napětí se sčítají. [12]

$$\sigma = \sigma_{Hook} + \sigma_{Newton} = E\varepsilon + \lambda \frac{\delta.\varepsilon}{\delta.t}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{Hook} = \varepsilon_{Newton} \quad (56)$$



Obr. 24 Kelvinův model dle [13]

## **11.0 Klimatické podmínky**

Relativní vlhkost vzduchu je veličina, která udává poměr mezi okamžitým množstvím vodních par ve vzduchu a množstvím par, které by měl vzduch při plném nasycení. Udává se v procentech (%). Množství par (vlhkost) ve vzduchu závisí především na teplotě vzduchu. Rosný bod je teplota, při které relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Pokud teplota klesne pod tento bod, nastává kondenzace. Vzduch za určité teploty může obsahovat jen určité množství vodních par. Čím je teplota vzduchu vyšší, tím více vlhkosti pojme. Pokud se vzduch začne ochlazovat, vodní páry začnou kondenzovat. Příklad: Při sprchování, stoupá v koupelně teplota a vlhkost. Když vlhkost dosáhne rosného bodu, začne voda kondenzovat na zrcadle, jehož teplota je nižší než teplota vzduchu. Jakmile se po chvíli zrcadlo zahřeje na okolní teplotu, sražená vodní pára se ztratí. [8]

### **11.1 Charakteristiky vlhkosti**

Vlhkost je základní vlastností vzduchu. Vlhkost vzduchu udává, jaké množství vody (vodní páry) obsahuje dané množství vzduchu. Množství vodní páry je časově velice proměnlivé a liší se také od místa k místu. [8]

### **11.2 Vlhkost vzduchu na Zemi**

Velké množství vodních par a vysoké hodnoty absolutní vlhkosti vzduchu jsou v teplých tropických oblastech, kdežto malé množství vodních par je v chladných polárních oblastech a vyšších nadmořských výškách. V atmosféře se voda vyskytuje ve třech skupenstvích: plynném, kapalném a pevném. Vlhkost vzduchu je meteorologický prvek popisující množství vodní páry ve vzduchu, která vzniká vypařováním vody z řek, rybníků, jezer, moří, půdy, povrchu rostlin, živočichů a lidí. [8]

### **11.3 Rozdělení vlhkosti**

- Absolutní vlhkost vzduchu - vodní pára obsažená ve vzduchu o objemu 1 m<sup>3</sup>. Je-li vzduch za určité teploty vodní párou nasycen, má největší možnou vlhkost. Nemůže přijímat další vodní páru. Ochladí-li se vzduch, část vodní páry zkapalní. Zvýší-li se naopak teplota vzduchu, může opět přijmout další vlhkost. Na vlhkost vzduchu má proto vliv i jeho teplota. [8]

- Relativní vlhkost vzduchu - praktické posouzení vlhkosti vzduchu. Relativní vlhkost se uvádí v procentech. Dokonale suchý vzduch má relativní vlhkost 0 %. Dokonale nasycený vzduch vodní párou má relativní vlhkost 100 %. Vypařování vody z pokožky našeho těla je důležitým činitelem pro regulaci teploty těla. Čím větší je relativní vlhkost vzduchu kolem nás, tím pomaleji se voda z povrchu našeho těla vypařuje a naopak. Vlhkost vzduchu v okolí člověka má proto veliký význam pro jeho pracovní výkon a zdravotní stav. Nejpriznivější vlhkost vzduchu v uzavřené místnosti při teplotě asi 20 °C je 45 až 65 %. Relativní vlhkost vzduchu se měří vlhkoměry. [8]

#### **11.4 Vlhkost vzduchu a relativní vlhkost vzduchu**

Pro zajištění zdravého, příjemného prostředí je nejdůležitější podmínkou teplota vzduchu a jeho relativní vlhkost. Zvláště v zimním období, kdy dochází k poklesu relativní vlhkosti vzduchu na nežádoucí hodnoty. Čím je teplota vyšší, tím více vodní páry se ve vzduchu udrží. Zahřejeme-li však v zimě chladný vzduch na příjemnou teplotu klesá relativní vlhkost. K zachování příjemného a zdravého prostředí je třeba dodatečného zdroje vodních par, tedy zvlhčovače vzduchu. [8]

#### **12.0 Vliv klimatických podmínek na textilní vlákna**

Vliv klimatických podmínek na textilní vlákna závisí na jejich původu (přírodní, chemická) a tedy na jejich složení. Přírodní vlákna dělíme dále na rostlinná, živočišná a anorganická. Chemická vlákna dělíme podle jejich složení na vlákna: z přírodních polymerů, syntetických polymerů, z anorganických surovin.

Živočišná vlákna jsou složena z bílkovin, rostlinná vlákna obsahují celulózu, hemicelulózy, lignin. Mezi rostlinná vlákna patří např. bavlna, len, juta a mezi živočišná vlna (hlavní složkou je keratoprotein, bílkovina s vysokým obsahem cystinu) a hedvábí (vlastní vlákno je tvořeno fibroinem 78 % a hedvábný klič sericinem 22 %). Fibroin obsahuje jednoduché aminokyseliny - glycin a alanin a narozdíl od keratoproteinu vlny neobsahuje žádný cystin, tj. žádné siřné sloučeniny. Sericin není ve vodě rozpustný – odkližováním hydrolyzuje na aminokyseliny. [7]

## 12.1 Vliv světelného záření

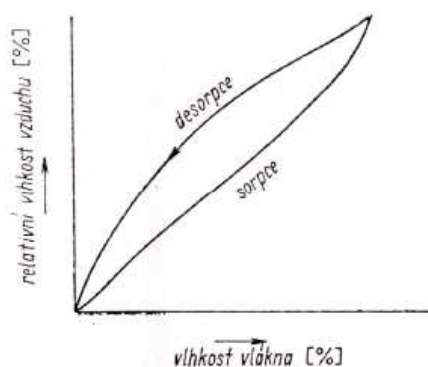
- Celulózová vlákna, zejména bavlna, pokud neobsahují již oxidované podíly, nejsou za normálních podmínek slunečním světlem odbourávána. Teprve po zušlechťovacích procesech se stávají náchylnými k oxidativnímu odbourání vlivem UV složky světla. Dochází ke vzniku koroze a degradace polymerních materiálů, volných radikálů a hyperoxidů. Zhoršují se mechanické vlastnosti vláken, tvoří se karboxylové skupiny a následně se uvolňuje CO<sub>2</sub>. Velice citlivý je účinek kypových barviv (indigo), která značně urychlují poškození celulózy. Přímá (substantivní) barviva chrání celulózová vlákna před účinkem slunečního světla. Největší ochranný vliv mají diazobarviva. Zásaditá barviva působí největší degradaci celulózových vláken, přičemž degradační účinek se navíc zesiluje současným rozkladem mořidel doprovázeným vznikem nestabilních peroxidů. [7]
- Ve vlněných vláknech se vlivem slunečního záření porušují cystinové a tryptofanové části polypeptidického řetězce. Dochází ke zhoršení mechanických vlastností vláken. Vlivem světelného záření se mění přirozená barevnost vlněných vláken. Viditelná složka světla vlnu bělí, UV způsobí její žloutnutí. Za přítomnosti vlhkosti je žloutnutí vlny 10 x rychlejší než v suchém prostředí. [7]
- Hedvábí je ze všech přírodních vláken nejvíce citlivé na sluneční záření. UV složka světla způsobuje žloutnutí a fotooxidaci hedvábí. Výsledkem fotooxidace je tedy změna barvy, křehnutí a snížení mechanické pevnosti hedvábných vláken. Odolnost hedvábí vůči slunečnímu záření je závislá na hodnotě pH. Hedvábí mu více odolává v kyselém nebo zásaditém prostředí v porovnání s neutrálním pH=(6-8). U zatěžkávaného hedvábí se snižuje odolnost fotooxidaci, protože kovy působí jako katalyzátory reakce. [7]

## 12.2 Vliv vlhkosti

Textilní vlákna udržují rovnováhu vlhkosti s okolním prostředím. Absorpcí nebo desorpcí vody dochází ke změnám rozměrů vláken. Tyto rozměrové změny mohou vést k odírání a mechanickému poškození vláken. Pokud je voda absorbována do vláken z vodní páry, dochází nejprve ke kondenzaci na povrchu vláken. V závislosti na relativní vlhkosti vzduchu je část kondenzované vody transportována do vlákna. Část zůstává na povrchu a je

transportována kapilárními silami. Vlivem přítomnosti molekul vody dochází zejména v přístupných (amorfních) oblastech vlákna k tvorbě sekundárních vazeb, což má za následek větší uspořádání systému. Sorpci vlhkosti ve vláknech ovlivňují hydrofilní skupiny v makromolekule vlákna a jejich přístupnost pro molekuly vody. Celulózová vlákna mají tři hydrofilní hydroxylové skupiny ve své strukturní jednotce přesto však nesorbují vlhkost stejně (závisí na jejich přístupnosti). Proteinová vlákna mají rovněž dostatek skupin, které mohou sorbovat molekuly vody (-OH, -NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, -COO<sup>-</sup>, -NH-). [8]

Molekuly vody se mohou vázat přímo na aktivní místa (hydrofilní skupiny, nebo skupiny schopné s vodou vytvářet vodíkové můstky) nebo na molekuly vody již ve vláknech obsažené. Sorpce a desorpce vlhkosti neprobíhají u textilních vláken stejně. To znamená, že vlhkost vlákna, která je za daných podmínek (teplota, tlak, relativní vlhkost vzduchu) v rovnováze s okolím, bude různá, jestliže tohoto rovnovážného stavu bylo dosaženo sorpcí nebo desorpcí.[7]



Obr. 25 Závislost vlhkosti vlákna na relativní vlhkosti vzduchu dle [11]

Množství vlhkosti v různých typech vláken za standardních podmínek je uveden v tabulce.

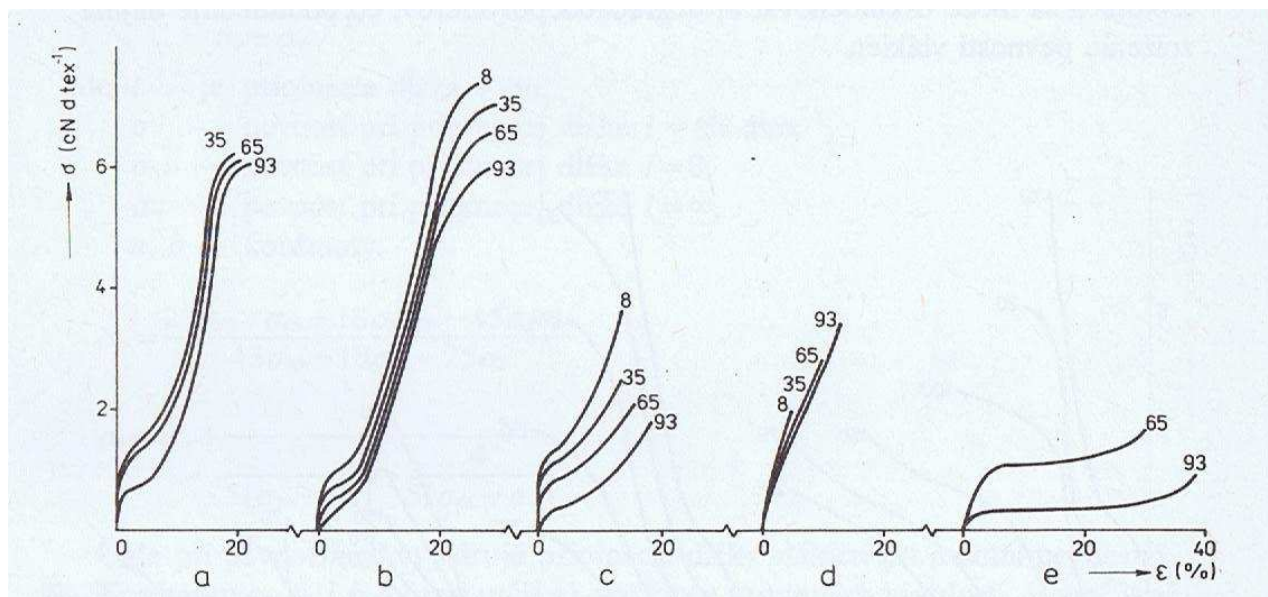
Typ vlákna	Obsah vlhkosti %
bavlna	6-8
Len, konopí	12
juta	13,8
vlna	16-18
hedvábí	11

Tabulka 2 Množství vlhkosti ve vláknech při 20 °C a 65% RH dle [11]



Obecně v celulózových vláknech dochází ke zvýšení pevnosti se zvyšujícím se obsahem vlhkosti a naopak u vlněných a hedvábných vláken dochází ke snížení pevnosti se zvyšujícím se obsahem vlhkosti. To však nemusí platit pro již poškozená vlákna. Bavlněná vlákna jsou velmi citlivá na změnu vlhkosti. V nasyceném prostředí vodní páry pohlcuje bavlna 25-27 % vlhkosti. Lněná i jutová vlákna jsou silně navlhavá, juta je schopná pojmout v páře až 34 % vlhkosti. Vlněná vlákna při 100 % relativní vlhkosti vzduchu obsahují až 33 % vlhkosti. Při nízké relativní vlhkosti vzduchu (méně než 40 %) se přírodní vlákna stávají křehká a lámavá, dochází k jejich vysušení. Obecně voda působí v polymerech (tedy i v textilních vláknech) především jako plastifikátor snižující teplotu skelného přechodu a zvyšující tažnost. Důsledkem absorpce vody je změna rozměrů vláken – jejich bobtnání. Vlivem tvorby vodíkových můstků v amorfních oblastech vlákna dochází k výraznému příčnému bobtnání, podélné bobtnání je výrazně nižší, což vede k anizotropii bobtnání vláken. Nativní bavlněná vlákna mohou v kapalně vodě bobtnat v příčném směru až o 40 % původního objemu (podélné bobtnání je do 1 %). Lýková rostlinná vlákna, která obsahují vyšší obsah ligninu, bobtnají ve vodě méně. Vlněná vlákna bobtnají v příčném směru o 35-40 % a v podélném o 1-2 %. Jak již bylo řečeno, vlněná vlákna nejméně bobtnají v isoelektrické oblasti tj. při hodnotě  $pH=(5-7)$ . K mnohem většímu bobtnání dochází nad a pod isoelektrickou oblastí. Vznik vodíkových můstků se zvláště projevuje po namočení vlněných vláken do vody a následujícím protažení a vysušení. Toto protažení, které může být až na dvojnásobnou délku, je trvalé do doby, kdy se vlákno opět nenamočí do vody a vrací se na svoji na původní délku. Ve studené vodě bobtnají vlněná vlákna asi o 10 %, chemicky poškozená o 20 % i více. Při opatrném sušení se rozměry vlákna vrací do svých původních rozměrů. [8]

Se stoupající sorpcí vlhkosti vláken se zvyšuje vliv relativní vlhkosti vzduchu na závislost napětí na deformaci. Charakter změn je podobný jako při změnách jiných vlastností, podmíněných snížením intenzity mezimolekulových vazeb. Částečně odlišná závislost je v případě hodnocení bavlny. Je podobná jako při sledování mechanických vlastností za mokra. [3]



Obr. 26 Vliv relativní vlhkosti vzduchu na závislost napětí od deformace, čísla u křivek vyjadřují relativní vlhkost v % při teplotě 20 °C a – PES, b – PAD, c – VS, d – Bavlna, e – vlna dle [3]

### 12.3 Vliv teploty

Všechna přírodní vlákna při teplotách nad 100 °C prodělávají nevratné změny, které mají podstatný vliv na jejich vlastnosti.

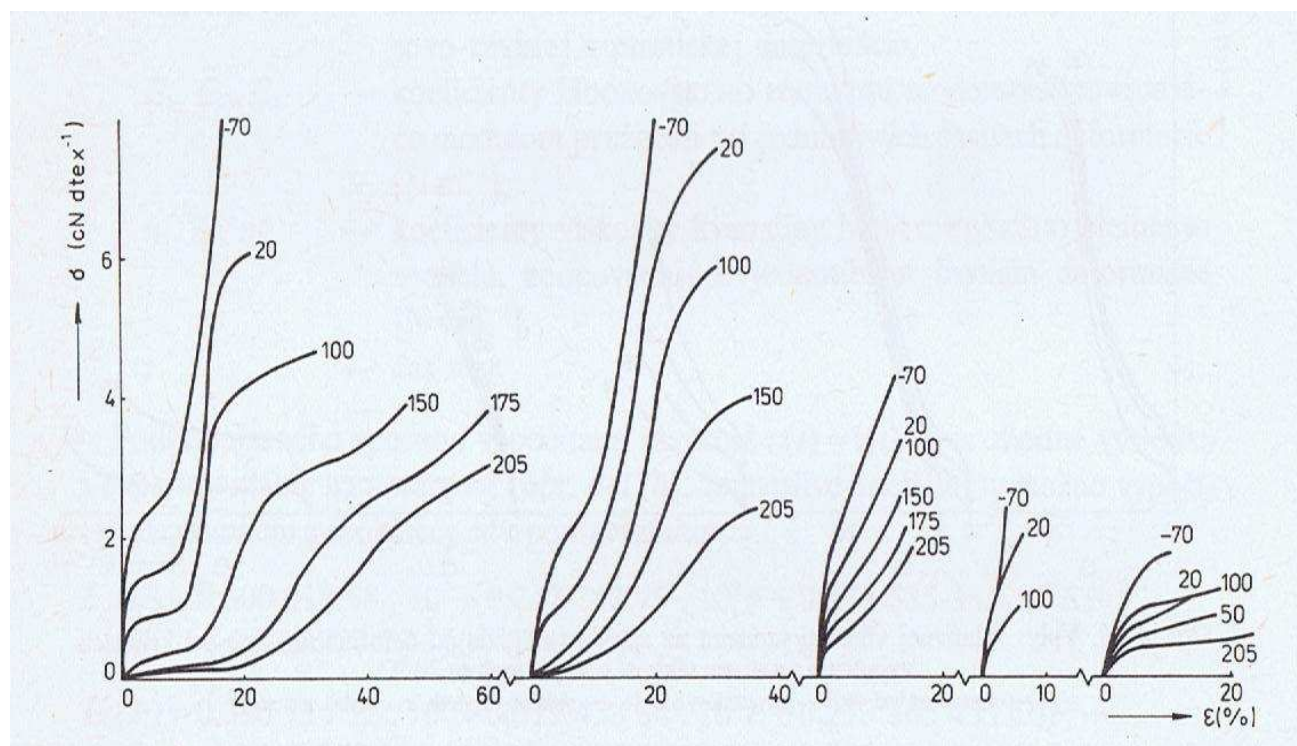
- Celulózová vlákna mají poměrně dobrou tepelnou stabilitu. Při teplotách do 100 °C nenastávají větší změny. Při působení suchého vzduchu o teplotě 110 °C dochází k depolymeraci vláken (jejich žloutnutí až hnědnutí), při 150 °C se tvoří pyrocelulóza, při 240 °C vlákna zplynují a uhelnatí. Za přítomnosti vlhkosti dochází k hydrolyze již při 60 °C. Důsledkem je pokles pevnosti i všech ostatních jakostních parametrů. Podobně se chovají všechna celulózová vlákna. [7]
- Keratinová vlákna jsou za sucha rovněž poměrně dosti odolná vůči teplu. V suchém teple kolem 115 °C ztrácí vlna chemicky vázanou vodu, kterou již nemůže pojmout zpět. Při zahřívání na vyšší teploty (180 °C) se uvolňuje sirovodík a amoniak. Vlna vlivem vlhkého tepla ztrácí svou pevnost, stává se však tvárnou. Suché teplo při 100-106 °C působí po delší době velmi nepříznivě, vlna ztrácí svou tvárnost a křehne. Aby vlněné zboží

neztvrdlo, nesmí se sušit při vyšších teplotách než 50-80 °C. Vlhký teplý vzduch způsobuje štěpení peptidických vazeb za vzniku karboxylových a aminových skupin. Při déle trvajícím zahřívání na 100 °C se oxidují cystinové můstky až na kyselinu sírovou a vlna ztrácí svoji pevnost. Obsahuje-li vlněné zboží po praní stopy alkálií, nastává hydrolýza již při podstatně nižší teplotě a uniká amoniak. Všeobecně je možné říci, že suché teplo působí na vlnu méně škodlivě než vlhké při stejné teplotě. [7]

- Hedvábí je vůči vyšší teplotě citlivější než vlna.

#### 12.4 Vliv teploty prostředí na závislost $\sigma = f(\epsilon)$

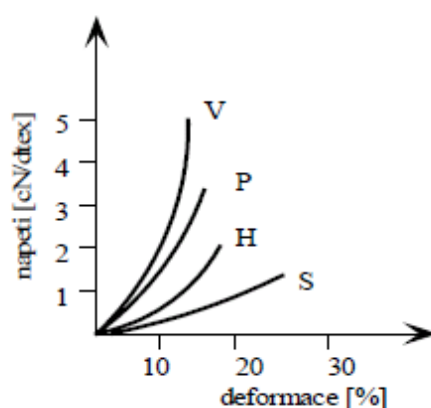
Se stoupající teplotou se ve všech případech snižuje pevnost a modul pružnosti vláken. Tažnost se zvyšuje. Tyto změny jsou podmíněny především zvýšenou pohyblivostí segmentů v nekystalických oblastech. Tím se snižuje především modul pružnosti nekystalických oblastí, což při konstantnosti modulu pružnosti krystalických oblastí podmiňuje snížení modulu pružnosti vláken. Při vysokých teplotách se může projevit i degradace polymerů, to podmiňuje zejména snížení pevnosti vláken. [3]



Obr. 27 Vliv teploty prostředí na závislost napětí od deformace, čísla u křivek udávají teplotu prostředí v °C při relativní vlhkosti 65%, a – PES, b – PAD, c – VS, d – bavlna, e – vlna dle [3]

## 12.5 Vliv vlhkosti na viskózová vlákna

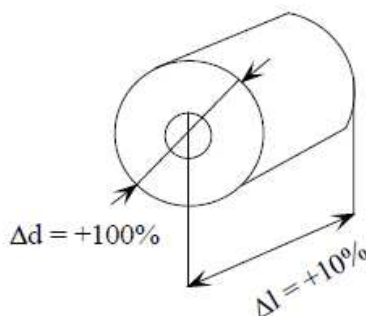
Pro náš experiment jsem vybral viskózovou přízi a to z hlediska jejího složení a vysokého podílu navlhavosti. Zde si připomeňme její základní vlastnosti. Viskózová vlákna tvoří 80% chemických vláken z přírodních polymerů. Jejich základní nevýhodou je ekologicky neúnosný způsob výroby. Z hlediska vývoje viskózových vláken hovoříme o vláknech standardních, vláknech II. a III. generace. Různé generace vláken mají vylepšené vlastnosti. [7]



Obr. 28 Zobrazení pevnosti různých druhů viskózových vláken

S – standardní, V- vysoce pevná, P – polynomická, H – HWM, P+H - modálová vlákna dle [7]

Viskózová vlákna vykazují drastický pokles mechanické odolnosti ve vodě !  $\Delta l = +10\%$ ,  $\Delta d = +100\%$



- **Mechanické vlastnosti za vlhka**

Pevnost v ohybu: 25 - 30% fs

Navlhavost: 11 - 13%

Vlákna vykazují silné bobtnání ve vodě

- **Termické vlastnosti**

Při teplotě 174 – 190 °C nastává počátek destrukce

Hořlavost:  $\text{LOI} = 0.197$  (ba: 0.184)<sup>5</sup>

Viskóza má chování blízké celulóзовých vláknům. [7]

## **12.6 Faktory, které ovlivňují poškození textilních vláken**

- **Světlo**

UV složka záření je hlavní příčinou blednutí a křehnutí textilu.

- **Relativní vlhkost**

Textilní vlákna jsou hygroskopický materiál, který mění svou vlhkost podle vlhkosti okolního vzduchu. Absorpcí nebo desorpcí vody dochází k rozměrovým změnám vláken (bobtnání nebo smršťování). Tyto rozměrové změny mohou vést k odírání a mechanickému poškození vláken, tedy celých tkanin. Vysoká relativní vlhkost (nad 66 %) může urychlovat chemické a biologické poškození textilu. Textil uchovávaný při relativní vlhkosti nad 60 % může být snadno napaden plísněmi. Naopak pokles relativní vlhkosti pod 20 % způsobuje přeschnutí vláken, vlákna ztrácí svoji pružnost, křehnou.

- **Teplota**

V ideálním případě by měl být textil uchováván v chladu, doporučuje se 5-10 °C. Kompromisem zohledňujícím lidské nároky je teplota 15-20 °C. [8]

## **13.0 Experimentální část**

Úkolem této diplomové práce je analýza chování osnovních nití při různých klimatických podmínkách. Osnovní nit, jak již bylo několikrát zmiňováno, je v tkacím procesu zatěžována dynamicky a to zejména ve fázi vytváření prošoupu, kdy se protahuje v řádu několika milimetrů. Z tohoto důvodu je důležité vědět, jaké deformační děje v niti probíhají a jaký to má vliv na změnu jejich mechanických vlastností. Nejvíce nás budou zajímat změny komplexního dynamického modulu tuhosti a ztrátového úhlu v závislosti na změně klimatických podmínek. Jak jsem již uváděl v předešlých kapitolách změřit zatížení osnovní nitě v procesu tkaní není jednoduchá záležitost. První možností je použití ručního snímače tahových sil (tenzometru), který se provlékne osnovní nití v prostoru tkací roviny. Z tohoto měření jsme schopni získat hodnoty zatěžujících sil v požadovaných technologických

operacích tkaní. Pro podrobnější studium mechanického chování osnovních nití je tento způsob měření nedostatečný, neboť jsme limitováni technickými možnostmi tkacího stroje.

Z tohoto důvodu bylo sestrojeno speciální měřicí zařízení, které má k dispozici samostatný budič vibrací (bude podrobněji popsáno v následujících kapitolách), na kterém si můžeme vyzkoušet podstatně více zatěžujících režimů, než přímo na tkacím stroji.

Hlavním cílem této práce je simulovat různé klimatické podmínky při měření deformačních vlastností osnovní nitě. Z tohoto důvodu bylo sestrojeno opláštění (klimatizovaná komora) celého měřicího zařízení, ve kterém byly měněny podmínky měření. V rámci technických možností jsme měnili především teplotu a relativní vlhkost vzduchu.

### **13.1 Teoretické předpoklady**

Teoretické předpoklady ohledně závislosti modulu tuhosti nití na klimatických podmínkách publikovány nejsou. Jedná se o ne zcela prozkoumanou oblast, můžeme se pouze odvolat na modul pružnosti, kde teorie předpokládá, že dynamický modul pružnosti s teplotou klesá. Dále teorie předpokládá, že mezi ztrátovým úhlem  $tg\delta$  a relativní vlhkostí existuje přímá závislost, při teplotě 20°C, statické deformaci 2%, dynamické deformaci 0,1%, frekvenci protahování 20 cyklů za sekundu, hodnoty  $tg\delta$  u viskózy mají maximum při 30% relativní vlhkosti. PAD 6 při 85%, při dalším zvyšování teploty se uvedené maxima posouvají k nižším relativním vlhkostem. Bude-li toto platit i pro modul tuhosti, ukáží až výsledky měření.

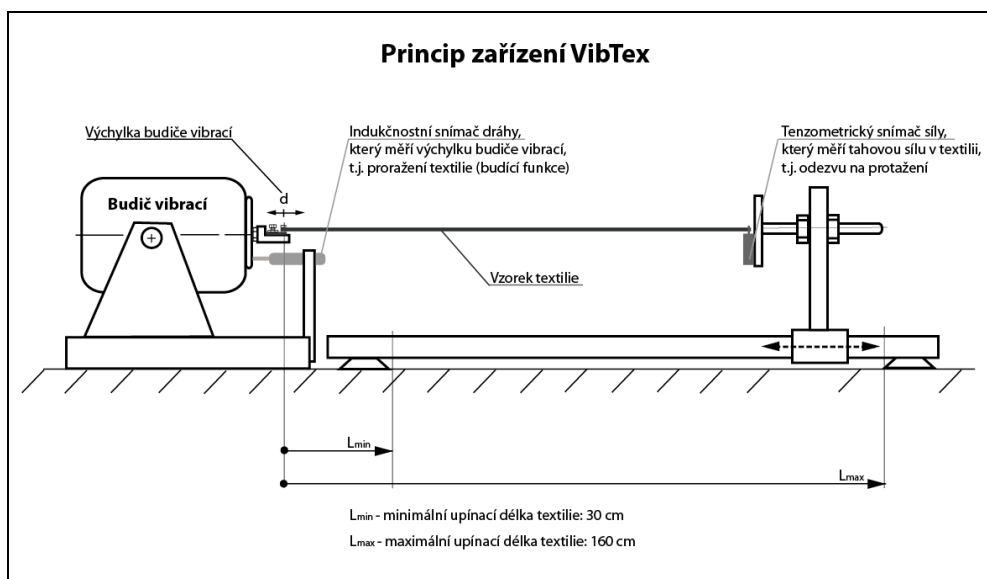
### **13.2 Použitý materiál**

Jako vhodný materiál pro experiment jsme si zvolili dvojmo skanou viskózovou (Lyocelovou) přízi o jemnosti 25 Tex. Viskóza je silně navlhavá a s rostoucím podílem vlhkosti ztrácí pevnost.

### **13.3 Měřicí zařízení**

Při proměřování mechanických vlastností osnovních nití přímo na stroji jsme limitováni z několika hledisek (omezený prostor, omezené otáčky tkacího stroje, nemožnost upnutí jedné osnovní nitě do dvou čelistí a tak dále). Z těchto důvodů bylo sestrojeno speciální měřicí zařízení VibTex, které se skládá z budiče vibrací(harmonických kmitů), tenzometrických snímačů zatížení a řídicího systému. Požadované předpětí nitě se nastavuje pomocí stavěcích šroubů, na nichž je upevněn tenzometr, konkrétně tato činnost není vůbec jednoduchá a

vyžaduje určitou zkušenost. Budič vibrací dovoluje nastavit požadovanou výchylku zhruba do 10 mm při maximální frekvenci 35 Hz, což odpovídá otáčkám tkacího stroje 2000 ot/min.



Obr. 29 Schéma měřicího vibračního zařízení dle [9]

## 14.0 Vlastní měření

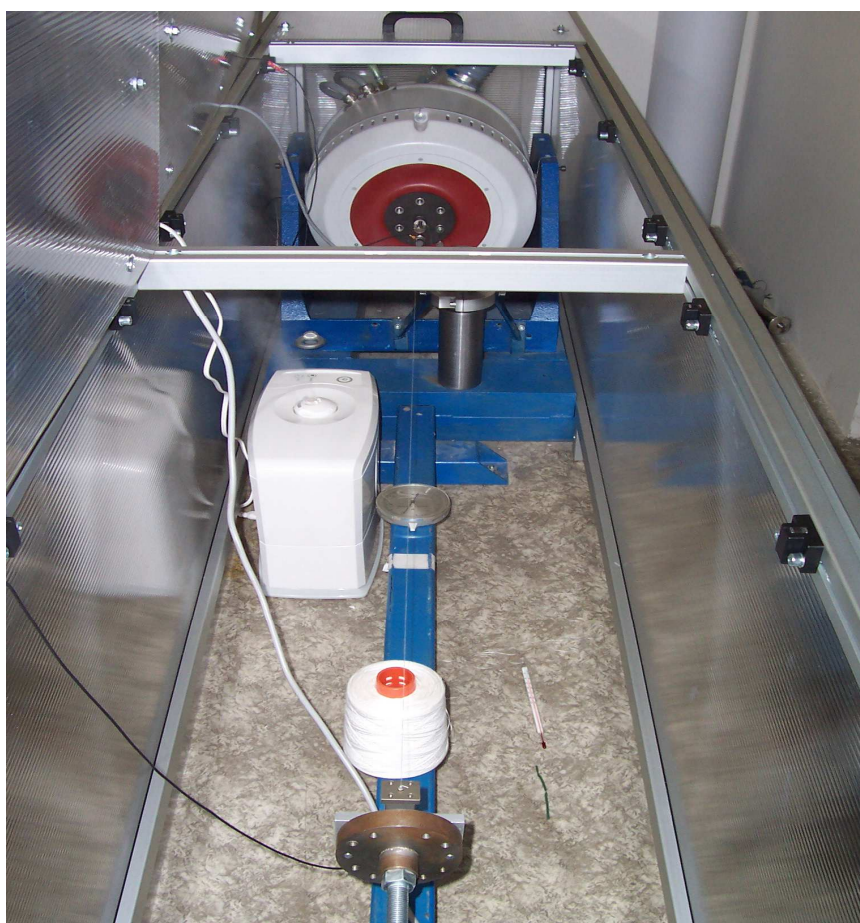
Pro náš experiment jsme si stanovili tři různé klimatické podmínky.

- Měření za běžných klimatických podmínek (běžné prostředí v laboratoři), teplota vzduchu 22 °C, relativní vlhkost 37 %.
- Měření za klimatizovaných podmínek prostředí na nejnižší teplotu 13,4 °C, relativní vlhkost 38 %.
- Měření za klimatizovaných podmínek prostředí na nejvyšší teplotu 38,3 °C, relativní vlhkost 60 %.

V průběhu měření ještě nebyla v laboratoři k dispozici mobilní klimatizace, která měla být umístěna do klimatizované komory s měřicím aparátem, ve které by byla nit ponechána po dobu jednoho týdne. Museli jsme proto zvolit náhradní řešení, pro měření za snížené teploty jsme ponechali cívku s nití po dobu 24 hodin v mobilní autochladničce, která byla k dispozici přímo u měřicího zařízení. Pro měření deformace za zvýšené teploty, byla cívka s nití



vystavena mobilnímu horkovzdušnému přímotopu a zvlhčovači přímo v měřicí komoře po dobu 24 hodin. U všech případů měření průběh teploty a relativní vlhkosti zaznamenával digitální USB teploměr + vlhkoměr, který na základě průběhu měření stanovil průměrné hodnoty. Frekvence namáhání jsme si zvolili 5-10-50 Hz s protažením 5mm, 100 Hz s protažením 3mm (jsme limitováni technickými možnostmi vibračního zařízení), protažení 5mm zhruba odpovídá 60 mm zdvihu listů na tkacím stroji PICANOL – GAMA, který je umístěn v tkalcovské laboratoři, zdvih jsme změřili přímo na stroji a to jako vzdálenost mezi spodní a horní úvratí zdvihu listu. Pro každou frekvenci bylo provedeno 10 měření; celkem tedy 120 měření.



Obr.30 Měřicí zařízení v laboratoři KTT

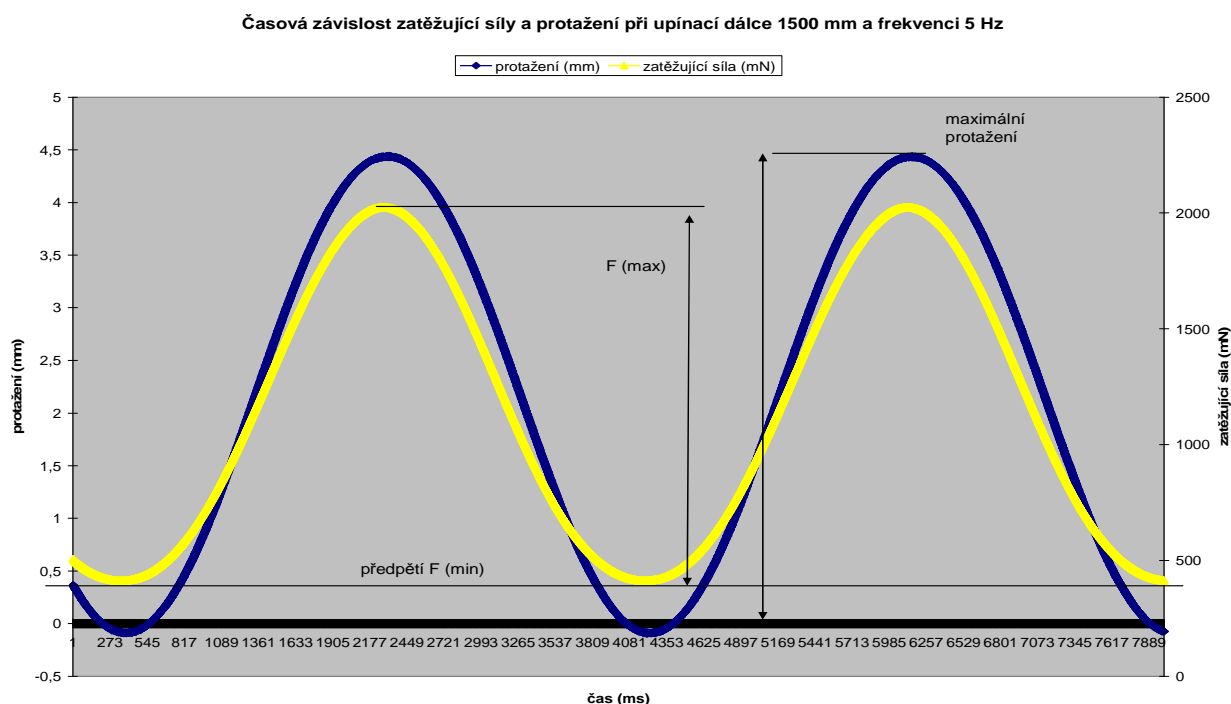
#### 14.1 Zpracování výsledků měření

V této kapitole budeme diskutovat nad výsledky měření a jejich významu. Jak jsem již uváděl, nit byla namáhána harmonicky, to znamená opakovaně síla nabývala námi stanoveného maxima a stanoveného minima, které bylo definováno také jako předpětí.

Časová



závislost síly na protažení je zobrazena na níže uvedeném obrázku, charakter průběhů je pro všechna měření stejný, jen dosahujeme jiných hodnot.



Graf 1 Časová závislost síly a protažení

Dynamický modul tuhosti, který nás velmi zajímá, získáme poměrem maximálních hodnot amplitud protažení a síly. Dochází-li mezi působící silou a protažením ke zpoždění, je dynamický modul závislý na frekvenci protažení a dochází k hysterezi  $H$ . Jedná se tedy o komplexní modul, který se skládá z reálné složky a imaginární. Pro studium chování osnovní příze při dané frekvenci je nutné stanovit ztrátový úhel  $\delta$  mezi působící silou a protažením dle vztahu

$$\delta = \arcsin \frac{H}{\frac{\epsilon_{\max}}{2} * \frac{F_{\max}}{2} * \pi}$$

kde  $F_{\max}$  je hodnota maximální síly,  $\epsilon_{\max}$  je hodnota maximálního protažení a  $H$  je hystereze. Všechny tyto hodnoty byly zpracovány v PC pomocí speciálního softwaru Mathematika a jsou uvedeny v tabulkách s výsledky měření.

## 14.2 Měření za běžných klimatických podmínek

Cívka s nití byla ponechána v laboratoři po dobu jednoho týdne. V den měření, byla průměrná teplota 22°C a relativní vlhkost vzduchu 37 %. Teplota a relativní vlhkost vzduchu byly snímány digitálním USB teploměrem + vlhkoměrem na třech místech, konkrétně na dvou místech podlahy měřicí komory a v místnosti ve výšce 1,5 m nad podlahou z těchto třech měření byly stanoveny průměrné hodnoty. Upínací délka byla pro všechna měření 1500 mm měnila se pouze frekvence v budiči harmonických kmitů. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce naměřených hodnot zaokrouhlování, bylo nastaveno na šest desetinných míst.

Frekvence a protažení	Statistické ukazatele	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)
5 Hz - 5mm	Průměr	4,504	394,680	1973,424	351,240	3,754	350,488	22,966
	Sm. odchylka	0,042237	20,043502	79,182956	13,948325	0,129398	13,962004	0,455964
	IS 95%	0,026178	12,422863	49,077203	8,645102	0,080200	8,653580	0,282604
10 Hz - 5mm	Průměr	4,561	392,100	1976,392	347,337	3,980	346,499	24,095
	Sm. odchylka	0,003000	22,529754	65,579723	11,186979	0,139570	11,205577	0,552996
	IS 95%	0,001859	13,963830	40,645987	6,933634	0,086505	6,945161	0,342744
50 Hz - 5mm	Průměr	4,891	590,378	2434,590	377,134	0,024	377,132	0,151
	Sm. odchylka	0,019209	41,534938	80,277609	9,337698	0,190850	9,339978	1,244881
	IS 95%	0,011905	25,743148	49,755663	5,787458	0,118288	5,788872	0,771571
100 Hz - 3mm	Průměr	3,061	796,945	1973,82	387,928	6,351	385,539	42,899
	Sm. odchylka	0,027730	27,833232	70,140283	15,018347	0,355933	14,974604	2,680412
	IS 95%	0,017187	17,250898	43,472599	9,308297	0,226061	9,281185	1,661306

Tabulka 3 Výsledky měření deformačních vlastností za běžných klimatických podmínek

## 14.3 Měření za klimatizovaných podmínek – zvýšená teplota a relativní vlhkost

Cívka s nití byla umístěna do měřicí komory, ve které se nachází měřící zařízení, v době měření ještě nebyla na komoru nainstalovaná mobilní klimatizace, tato operace si vyžádá další konstrukční úpravy opláštění zařízení VibTex, které by měly být realizovány během druhé poloviny roku 2011. Vyšší teplotu jsme realizovali mobilním elektrickým přímotopem a vyšší vlhkost mobilním elektrickým zvlhčovačem. Oba elektrické spotřebiče byly zapnuty 24 hodin před realizací měření, teplota a relativní vlhkost byly snímány na třech různých bodech měřicí komory, konkrétně na obou koncích a uprostřed, ze kterých byl stanoven průměr 38,3 °C a relativní vlhkost 60 %. Upínací délka činila 1330 mm Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce.

Frekvence a protažení	Statistické ukazatele	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)
5 Hz - 5mm	Průměr	4,475	393,698	1881,328	332,558	3,854	331,809	22,260
	Sm. odchylka	0,023345	62,891048	144,385082	20,682214	0,287339	20,727618	0,920760
	IS 95%	0,000462	1,247105	2,863101	0,410120	0,005697	0,411020	0,018258
10 Hz - 5mm	Průměr	4,548	402,777	1980,472	346,986	3,719	346,256	22,435
	Sm. odchylka	0,006000	38,791120	130,829544	21,608092	0,241306	21,633704	0,982916
	IS 95%	0,000118	0,769213	2,594300	0,428480	0,004785	0,428988	0,019490
50 Hz - 5mm	Průměr	4,903	464,868	2168,942	348,819	0,556	346,730	3,419
	Sm. odchylka	0,022383	18,846413	36,959690	5,955364	0,062321	6,077925	0,390216
	IS 95%	0,000443	0,373717	0,732896	0,118092	0,001235	0,120522	0,007737
100 Hz - 3mm	Průměr	3,020	738,757	1844,410	366,470	6,715	363,622	42,744
	Sm. odchylka	0,037416	52,956423	75,589246	14,449532	0,488820	14,571966	2,504364
	IS 95%	0,000741	1,050105	1,498906	0,286528	0,009693	0,288956	0,049660

Tabulka 4 Výsledky měření deformačních vlastností viskózní příze za klimatizovaných podmínek – vyšší teplota a vyšší relativní vlhkost

#### 14.4 Měření za klimatizovaných podmínek – snížená teplota

V tomto případě byla nit ponechána po dobu 24 hodin v přenosné autochladničce, která byla umístěna u měřicího zařízení v laboratoři KTT, průměrná teplota v chladicím boxu byla 13,4 °C a relativní vlhkost 38%, pro měření byla nit vyjmuta z chladicího boxu, odměřila se potřebná délka a cívka se ihned umístila zpátky do chladicího boxu, tento proces, kdy byla příze vyjmuta z klimatizovaného prostředí a ponechána okolním klimatickým podmínkám, netrval déle než 3 min. Pro připomenutí, teorie předpokládá že dynamický modul pružnosti s klesající teplotou roste. Upínací délka činila 1330 mm. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce.

Frekvence a protažení	Statistické ukazatele	Maximální protažení (mm)	Minimální síla (mN)	Maximální síla (mN)	Komplexní modul(N/m)	Fázové posunutí (st.)	Elastický modul (N/m)	Ztrátový modul (N/m)
5 Hz - 5mm	Průměr	4,477	402,585	2072,318	372,871	3,613	372,132	23,416
	Sm. odchylka	0,048	37,620	155,834	32,626	0,207	32,628	1,338
	IS 95%	0,000951	0,746	3,090	0,646	0,004110	0,647020	0,026535
10 Hz - 5mm	Průměr	4,553	392,542	2065,898	367,705	3,844	366,877	24,613
	Sm. odchylka	0,011874	43,716841	133,552158	26,087514	0,147322	26,066664	1,411109
	IS 95%	0,000235	0,866888	2,648289	0,517305	0,002921	0,516892	0,027981
50 Hz - 5mm	Průměr	4,899	474,948	2269,783	366,307	0,511	366,29	3,212
	Sm. odchylka	0,029137	41,803051	144,262946	25,891841	0,203541	25,897172	1,199673
	IS 95%	0,000577	0,828938	2,860680	0,513425	0,004036	0,513531	0,023789
100 Hz - 3mm	Průměr	3,045	749,705	1932,083	388,456	6,77	385,743	45,775
	Sm. odchylka	0,029748	52,014838	121,958910	26,928050	0,348051	26,784871	3,613439
	IS 95%	0,000589	1,031434	2,418399	0,533973	0,006901	0,531133	0,071653

Tabulka 5 Výsledky měření deformačních vlastností za klimatizovaných podmínek – snížená teplota

## **15.0 Zhodnocení měření**

Z výsledků měření je patrné, že hodnoty komplexního dynamického modulu tuhosti jsou při zvýšené teplotě a relativní vlhkosti nižší, než při nižších teplotách. Nejedná se sice o žádné dramatické rozdíly, ale lze je pozorovat v řádech 10 N/m. Jistě by bylo daleko zajímavější toto měření realizovat při větších teplotních rozdílech, přiblížit se teplotě 170-190 °C, kdy u viskózy nastává počátek destrukce a naopak zkoumat dynamický modul pod bodem mrazu. Dále by bylo vhodné realizovat měření v závislosti na měnící se relativní vlhkosti prostředí. Realizovat takováto měření by ovšem vyžadovalo daleko sofistikovanější a finančně nákladnější měřicí aparaturu, kterou momentálně nedisponujeme. Z hlediska technologického zpracování vláken, kde tkací proces zaujímá významnou roli, nám toto měření plně postačuje. Pro analýzu vlivu klimatických podmínek na osnovní příze, můžeme dojít k řadě závěrů, které nám dovolí tkací proces optimalizovat a to třeba tím, že vhodnou konstrukcí osnovní svůrky můžeme minimalizovat fázový posun  $\delta$ . Námi realizované podmínky měření zhruba odpovídaly teplotám a relativním vlhkostem, které mohou ve výrobě nastat. Z hlediska materiálového nám tato práce může posloužit jako dobrý základ pro další zkoumání mechanických vlastností materiálů osnovních nití. Při dalším zkoumání bychom určitě museli materiál testovat metodou DMA (dynamicko mechanická analýza), tato oblast je ale již většinou dobře známa a objasněna pro řadu materiálů, ovšem oblast, která není ještě plně prozkoumána je oblast chování přízí, které jsou dynamicky namáhány ve velkých upínacích délkách, ty simulují tok materiálu tkacím strojem.

### **15.1 Dynamický modul**

Průběh hodnot dynamického modulu tuhosti v závislosti na teplotě je uveden v tabulce. Pro připomenutí uvádím, že bylo provedeno celkem 120 měření. Měření nám ukazuje, že s rostoucí teplotou a vlhkostí komplexní dynamický modul tuhosti klesá.

Komplexní modul tuhosti		běžné klim. podmínky	zvýšená teplota	snížená teplota
5 Hz - 5mm	Průměr (N/m)	351,240	332,558	372,871
	Sm. odchylka	13,948	20,682	32,626
	IS 95%	8,64510	0,41012	0,64697
10 Hz - 5mm	Průměr (N/m)	347,33700	346,98600	367,70500
	Sm. odchylka	11,18698	21,60809	26,08751
	IS 95%	6,93363	0,42848	0,51731
50 Hz - 5mm	Průměr (N/m)	377,134	348,819	366,307
	Sm. odchylka	9,337698	5,955364	25,891841
	IS 95%	5,787458	0,118092	0,513425
100 Hz - 3mm	Průměr (N/m)	387,92800	366,47000	388,45600
	Sm. odchylka	15,01835	14,44953	26,92805
	IS 95%	9,30830	0,28653	0,53397

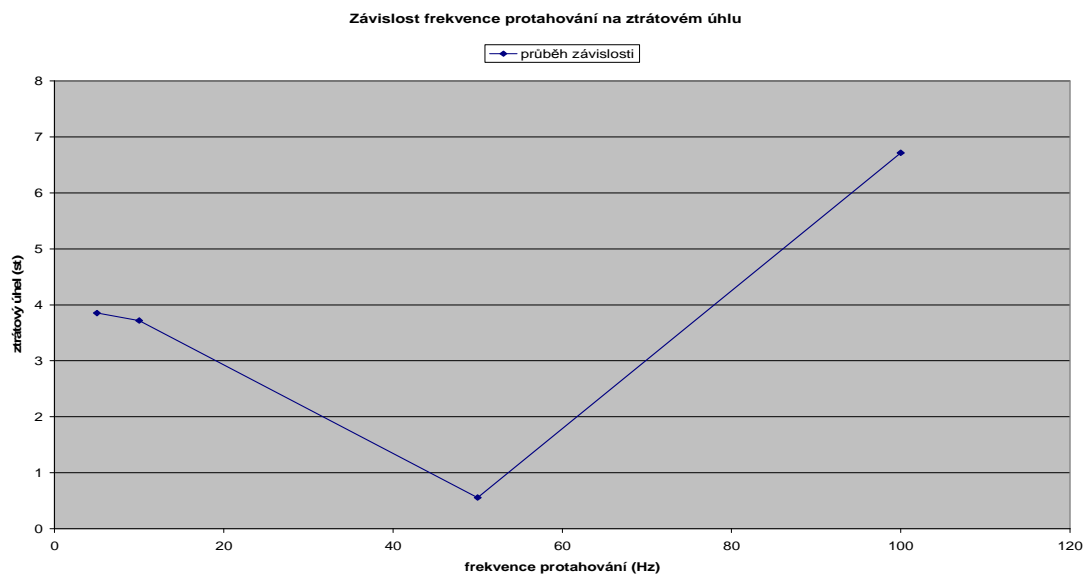
Tabulka 6 Porovnání naměřených hodnot komplexního dynamického modulu při různých frekvencích

## 15.2 Fázové posunutí

Měření jsme prováděli za čtyř různých frekvencí protahování 5, 10, 50 a 100 Hz. Je velice zajímavé a z výsledků měření zřejmé, že při frekvenci 50Hz je oproti jiným frekvencím fázové posunutí významně nejnižší, a to až o několik řádů. Nabízí se myšlenka, jaký je průběh závislosti fázového posunutí na frekvenci protahování. Jisté je, že určitě nebude lineární. Z hlediska klimatických podmínek můžeme konstatovat, že námi zvolený teplotní rozdíl neměl podstatný vliv na rozdíl ztrátového úhlu  $\delta$ . Jaký to má význam z hlediska technologického? Při frekvenci namáhání 50 Hz je fázové posunutí minimální, viskoelastické chování materiálu je také minimální, vzhledem k velikosti fázového posunutí můžeme přízi přirovnat k „dokonale elastickému materiálu“. Porovnání hodnot ztrátového úhlu  $\delta$  za příslušné frekvence je uvedeno v tabulce.

Ztrátový úhel		běžné klim. podmínky	zvýšená teplota	snížená teplota
5 Hz - 5mm	Průměr (st.)	3,754	3,854	3,613
	Sm. odchylka	0,129398	0,287339	0,207270
	IS 95%	0,080200	0,005697	0,004110
10 Hz - 5mm	Průměr (st.)	3,98	3,719	3,844
	Sm. odchylka	0,139570	0,241306	0,147322
	IS 95%	0,086505	0,004785	0,002921
50 Hz - 5mm	Průměr (st.)	0,024	0,556	0,511
	Sm. odchylka	0,190850	0,062321	0,203541
	IS 95%	0,118288	0,001235	0,004036
100 Hz - 3mm	Průměr (st.)	6,351	6,715	6,77
	Sm. odchylka	0,355933	0,488820	0,348051
	IS 95%	0,226061	0,009693	0,006901

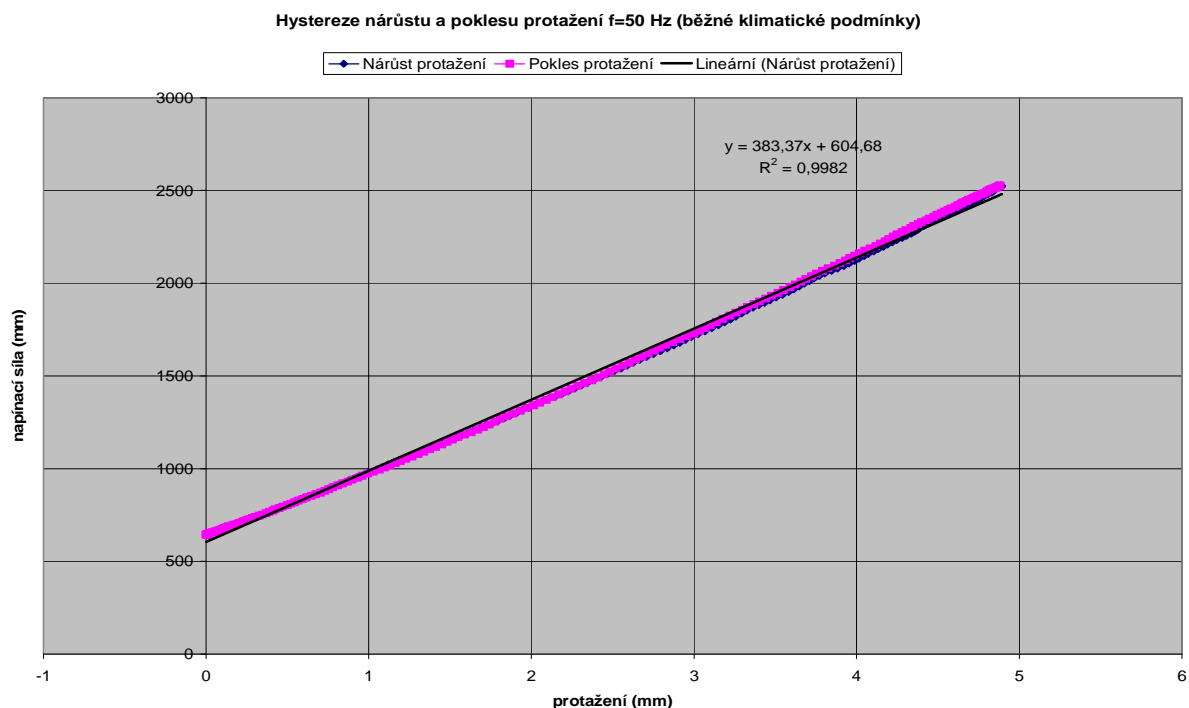
Tabulka 7 Porovnání naměřených hodnot ztrátového úhlu při různých frekvencích



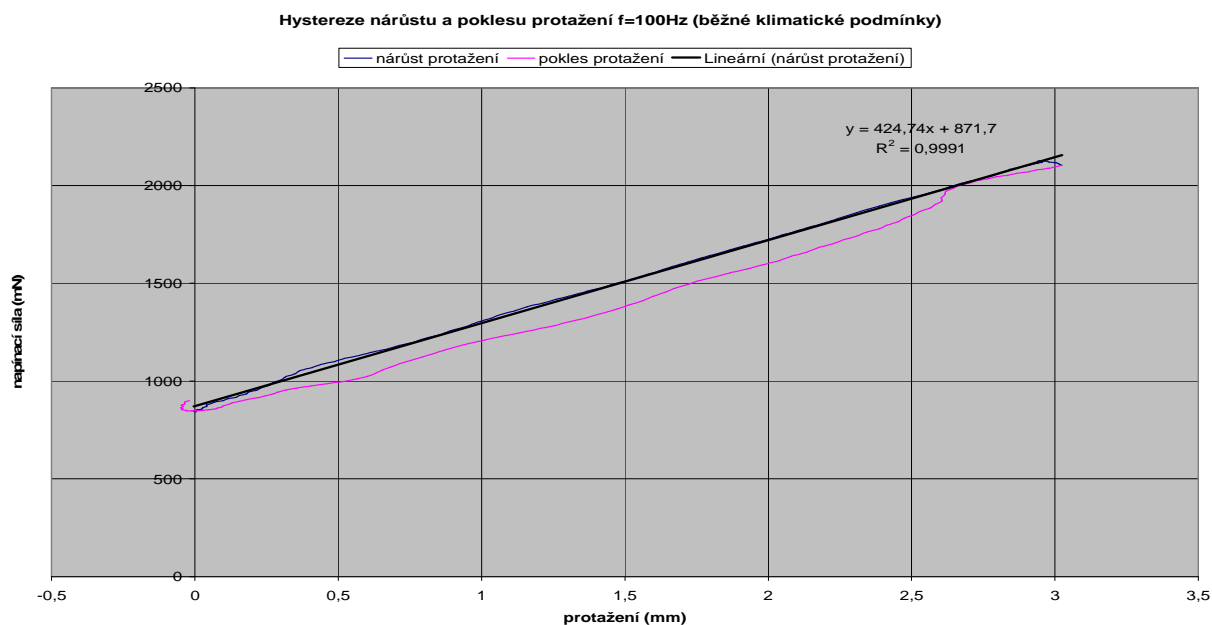
Graf 2 Průběh závislosti ztrátového úhlu na frekvenci protahování

### 15.3 Hystereze

Graf průběhu fyzikálních změn při cyklickém opakování podmínek se nazývá hysterezní křivka. Příkladem může být závislost budící síly a odezvy (protažení). Hysterezní křivka je důležitou charakteristikou látek, dají se z ní určit hodnoty ztrátového úhlu  $\delta$  a je možné určit tzv. hysterezní ztráty, které určují míru vložené energie přeměněné na teplo. Hysterezní ztráty jsou přitom přímo úměrné obsahu plochy ohraničené hysterezní křivkou. Pro názornou ilustraci hystereze jsem zde umístil dva grafy. V nich zobrazené hystereze jsem proložil přímkou a vypočítal korelační koeficient. První ilustruje nejnížší hodnotu, kterou jsme naměřili při frekvenci protahování 50 Hz. Druhý ilustruje největší hodnotu při frekvenci protahování 100 Hz.



Graf 3 Hystereze při frekvenci protahování 50 Hz



Graf 4 Hystereze při frekvenci protahování 100 Hz

Z výsledků měření pro viskóзовou přízi lze vidět, že hodnoty fázového posunutí  $\delta$ , mezi působící silou a protažením, jsou velmi nízké. Z toho plyne, že i hystereze  $H$  a imaginární část komplexního modulu je také nízká, nikoliv však bezvýznamná. Objektivním posouzením

můžeme říci, že závislost s ohledem na naměřené hodnoty můžeme nazvat lineární. Co je ale velmi zajímavé, je rozdíl hodnot  $\delta$  u frekvence protahování 50 Hz oproti jiným frekvencím a to ve všech 30 měřeních v různých podmínkách. Tento fakt nasvědčuje tomu, že fázový posun  $\delta$  je funkcí frekvence. Pro podrobnější popsání této závislosti a vytvoření matematického modelu by bylo ovšem nutné realizovat další experimentální měření po malém frekvenčním rozsahu; což i doporučuji jako jedno z dalších témat závěrečných prací.

## 16.0 Závěr

Hlavním úkolem této práce bylo navrhnout a realizovat vhodný experiment, kterým bychom analyzovali vliv klimatických podmínek na deformační vlastnosti osnovních nití. Pro posuzování deformačních vlastností textilních délkových viskoelastických materiálů jsou jako klíčové veličiny modul tuhosti a ztrátový úhel (fázové posunutí). Z naměřených hodnot můžeme konstatovat, že rozdíly nejsou nijak marginální, avšak u měření za zvýšené teploty a vlhkosti můžeme pozorovat pokles modulu tuhosti v řádech desítek Nm, což potvrzuje teoretické předpoklady o poklesu u modulu pružnosti. Měření za běžných klimatických podmínek a za snížené teploty dramatické rozdíly nevykazují, nutno podotknout, že obě měření proběhla za zhruba stejné relativní vlhkosti, která má na viskozovou přízi větší vliv, než námi realizovaný teplotní rozdíl. Bezpochyby by bylo vhodnější realizovat měření s daleko většími klimatickými rozdíly, a to jak u teploty, tak u relativní vlhkosti, ovšem takové měřicí zařízení, které by umožňovalo analyzovat deformační vlastnosti za těchto klimatických podmínek při velkých upínacích délkách, není na TU momentálně k dispozici. Nicméně si myslím, že i toto měření, které jsme realizovali, nám hodně napovědělo o tom, co se děje s délkovým textilním materiálem, který je vystaven dynamickému zatížení a ještě je vystaven různým podmínkám měření. Za nejdůležitější zjištění bych uvedl rozdíl ve fázovém posunutí při frekvenci protahování 50 Hz. Při porovnání s ostatními naměřenými hodnotami fázového posunutí se nabízí otázka závislosti fázového posunutí na frekvenci protahování. Toto měření naznačilo, že určitě nebude lineární a že bude mít své minimum; více se v této chvíli konstatovat nedá. Doporučuji proto navázat na tuto diplomovou práci a pokusit se objasnit závislost fázového posunutí na frekvenci protahování.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Petr Tumajer: Teorie tkaní, přednášky, Liberec 2004
- [2] Petra Strašáková: Analýza deformačních vlastností osnovních nití z hlediska tkacího procesu, Liberec 2009
- [3] Blažej, A., Šutá, Š., Vlastnosti textilních vláken, Bratislava 1982
- [4] Nosek, S.: Teorie tkacího procesu – část I., Dům techniky ČSVTS Pardubice
- [5] Talavášek, O.: Tkací stroje člunkové, bezčlunkové a víceprošlupní, STNL, Praha, 1988
- [6] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, přednášky  
[http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_06.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_06.pdf)
- [7] Militký, J., Textilní vlákna, přednášky,  
[http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/8Vlakna\\_z\\_prirodnich\\_polymeru.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20061005/8Vlakna_z_prirodnich_polymeru.pdf)
- [8] Škrdlantová, M., Koroze a degradace přírodních textilních vláken, přednášky VŠCHT, Praha, [http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze\\_textilnich\\_vlaken/kadm/pdf/3\\_6.pdf](http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/predmety/koroze_textilnich_vlaken/kadm/pdf/3_6.pdf)
- [9] Petr Tumajer: Využití vibračního systému pro testování textilií, Liberec, projekt GAČR 01/09/0466
- [10] Petr Tumajer: Výpočet modulů tuhosti, Liberec, projekt GAČR 01/09/0466
- [11] Neckář, B., Militký, J., Košková, B., Blažej, A., Šutá, Š., Zpracovatelské vlastnosti vláken, přednášky TUL, Liberec:  
[http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/zvt\\_p\\_1.pdf](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/zvt_p_1.pdf)
- [12] Reologické modely materiálů, přednášky, MFF-Univerzity Karlovy, Praha:  
[http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20%28cesky%29/1\\_lekce\\_ModelyMaterialu\\_01011\\_AnP.pdf](http://artax.karlin.mff.cuni.cz/~sidlof/vyuka/LA1/Materialy%20k%20prednaskam%20%28cesky%29/1_lekce_ModelyMaterialu_01011_AnP.pdf)
- [13] Viskoelastická látka: Wikipedia.:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Viskoelasticka%C3%A1\\_l%C3%A1tk%C3%A1](http://cs.wikipedia.org/wiki/Viskoelasticka%C3%A1_l%C3%A1tk%C3%A1)
- [14] Waweon: VÚTS Liberec, <http://www.vuts.cz/cze/waweon.html>
- [15] Vysoké učení technické v Brně: Ústav chemie materiálů, Praktikum ze struktury a vlastností polymerů, Brno 2008

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr.1 Schéma tkacího stroje
- Obr.2 Parametry prošlupu
- Obr.3 Použití snímače na rovném úseku nitě s obvyklými úhly opásání
- Obr.4 Vložení snímače do místa zalomení nitě
- Obr.5 Měření tahové síly osnovy na tkacím stroji
- Obr.6 Princip tahové zkoušky
- Obr.7 Hookov zákon
- Obr.8 Časová závislost cyklického napětí a deformace v jednom cyklu
- Obr.9 Vznik protažení osnovní nitě během otevírání prošlupu
- Obr.10 Geometrie prošoupu
- Obr.11 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně elastického materiálu
- Obr.12 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně elastických materiálů
- Obr.13 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u ideálně viskózních materiálů
- Obr.14 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u ideálně viskózních materiálů
- Obr.15 Časová závislost napětí a poměrné deformace při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů
- Obr.16 Časová závislost mezi napětím a poměrnou deformací při harmonickém namáhání u viskoelastických materiálů
- Obr.17 Deformační křivka
- Obr.18 Cyklus napětí
- Obr.19 Charakteristika modulu tuhosti
- Obr.20 Symboly reologických modelů
- Obr.21 Hookovská pružina a pracovní diagram
- Obr.22 Model Newtonské kapaliny a pracovní diagram
- Obr.23 Maxwelův model
- Obr.24 Kelvinův model
- Obr.25 Závislost vlhkosti vlákna na relativní vlhkosti vzduchu

Obr.26 Vliv relativní vlhkosti vzduchu na závislost napětí od deformace, čísla u křivek vyjadřují relativní vlhkost v % při teplotě 20 °C

Obr.27 Vliv teploty prostředí na závislost napětí od deformace, čísla u křivek udávají teplotu prostředí v °C při relativní vlhkosti 65%

Obr.28 Zobrazení pevnosti různých druhů viskózních vláken

Obr.29 Schéma měřicího vibračního zařízení

Obr.30 Měřicí zařízení v laboratoři KTT

## **SEZNAM TABULEK**

Tab.1 Odhady materiálových časů pro viskoelastické materiály

Tab.2 Množství vlhkosti ve vláknech při 20°C a 65% RH

Tab.3 Výsledky měření deformačních vlastností za běžných klimatických podmínek

Tab.4 Výsledky měření deformačních vlastností za klimatizovaných podmínek, vyšší teplota a vyšší relativní vlhkost

Tab.5 Výsledky měření deformačních vlastností za klimatizovaných podmínek, snížená teplota

Tab.6 Porovnání naměřených hodnot komplexního modulu tuhosti

Tab.7 Porovnání naměřených hodnot ztrátového úhlu při různých frekvencích

## **SEZNAM GRAFŮ**

Graf.1 Časová závislost síly a protažení

Graf.2 Průběh závislosti ztrátového úhlu na frekvenci protahování

Graf.3 Hystereze při frekvenci protahování 50 Hz

Graf.4 Hystereze při frekvenci protahování 100 Hz

## **SEZNAM PŘÍLOH**

1. Výsledky měření – běžné klimatické podmínky.
2. Výsledky měření – klimatizované podmínky, zvýšená teplota a relativní vlhkost.
3. Výsledky měření – klimatizované podmínky, snížená teplota.